CONSEIL GÉNÉRAL DE L'ÉCONOMIE
DE L'INDUSTRIE, DE L'ÉNERGIE ET DES TECHNOLOGIES

Association Française pour la Prévention des Catastrophes Naturelles
AFPCN
Mieux comprendre, mieux prévenir

Le Conseil général de l'économie (**CGE**) et l'Association française de prévention des catastrophes naturelles (**AFPCN**) vous invitent à une journée d'étude organisée avec l'appui de l'Académie des technologies et de l'Observatoire national des effets du réchauffement climatique (ONERC)[1].

CHANGER AVEC LE CLIMAT !

Dossier de séance

Mardi 30 juin 2015 de 9h à 18h
Centre de Conférences Pierre Mendès France
Salle Bloch Lainé
139 rue de Bercy 75012 Paris

[1] COMITE DE PILOTAGE : Maud Devès et Paul-Henri Bourrelier (AFPCN), Pierre Couveinhes et François Valérian (Conseil Général de l'Economie), Nicolas Bériot (ONERC, MEDDE), Bernard Tardieu (Académie des Technologies).

SOMMAIRE

SOMMAIRE..... 3

PRÉSENTATION DE LA JOURNÉE..... 5

PROGRAMME..... 7

RÉSUMÉ DES INTERVENTIONS 9

BIOGRAPHIES DES INTERVENANTS 19

ANNEXES 27

LISTE DES PARTICIPANTS 65

PRÉSENTATION DE LA JOURNÉE

Cette journée s'inscrit dans la perspective de la COP 21 qui se tiendra à Paris en décembre 2015 mais se propose d'élargir la réflexion au delà de cet horizon.

Nous savons aujourd'hui que les changements du climat impacteront nos modes d'existence à des échéances plus ou moins proches, selon la nature des risques envisagés. Il est essentiel de s'interroger sur les solutions économiques, technologiques et sociétales que nous sommes en mesure de mettre en œuvre pour changer avec le climat et atténuer l'impact des activités anthropiques sur le changement climatique.

Cette journée d'étude réunira des acteurs issus de divers secteurs de l'action publique (autorités nationales, organisations non-gouvernementales, institutions expertes, sociétés savantes, associations). Ils croiseront leurs expériences et leurs regards pour réfléchir ensemble, de manière ouverte et prospective, aux itinéraires possibles de l'adaptation et de l'atténuation.

Les interventions et débats de la matinée porteront sur les leviers économiques et les politiques publiques du changement climatique, les possibilités et les limites technologiques, et sur les opportunités et les difficultés rencontrées dans la construction de « récits du futur » communs.

L'après-midi sera consacrée au cycle du carbone et à ses composés. Trois tables rondes permettront d'aborder des domaines d'application concrets : l'utilisation des sols (agriculture, élevage) face aux enjeux de sécurité alimentaire, les actions d'adaptation et d'atténuation dans la gestion des forêts et l'industrie du bois, et enfin, la séparation, le stockage et la valorisation du CO_2.

PROGRAMME

8h30 Accueil des participants

9h00 Introduction à la journée par **Luc Rousseau**, vice-président du Conseil général de l'économie et **Christian Kert**, président de l'Association française pour la prévention des catastrophes naturelles.

LES ENJEUX ET CONDITIONS DE L'ACTION
Présidence Christian KERT

9h45 - 10h15

- **Les leviers économiques et les politiques publiques du changement climatique**
  Exposé de **François Valérian** (CGE) - Questions / réponses

10h15 - 10h45

- **Une vision technologique**
  Exposé d'**Olivier Appert** (président du Conseil français de l'énergie) - Questions / réponses

10h45 - 11h00 Pause

11h00 - 12h00

- **Où en est la prospective du 21ème siècle**
  Table ronde pilotée par **Thierry Gaudin** (CGE, Prospective 2100) avec la participation d'**Eric Brun-Barrière** (ONERC, MEDDE), **Moussa Mbaye** (ENDA), **Vaia Tuuhia** (4D)
  Débat avec la salle

12h00 - 13h30 Déjeuner libre

LE CYCLE DU CARBONE ET SES COMPOSES : TROIS EXEMPLES CONCRETS DE CHAMPS D'ACTION
Présidence Guillaume BENOIT

13h30 - 14h00

- **Actions de réduction et projections des concentrations atmosphériques de CO2**
  Exposé de **Philippe Ciais** (LSCE) - Questions / réponses

14h00 - 15h00

- **Sols, agriculture, élevage et sécurité alimentaire**
  Table ronde pilotée par **Guillaume Benoit** (Conseil général de l'agriculture) avec la participation de **David Crespo** (Président de Fertiprado), **Jean François Soussana** (INRA), **Bernard Tardieu** (Académie des technologies)

Débat avec la salle

15h00 - 15h30 Pause

15h30 - 16h30

- **Changer avec le climat : un enjeu majeur pour la forêt et le bois**
  Table ronde pilotée par **Jean-Luc Peyron** (GIP ECOFOR) avec la participation d'**Antoine Colin** (IGN), **Estelle Vial** (Institut technologique FCBA)
  Débat avec la salle

16h30 - 17h30

- **Séparation, séquestration et valorisation du CO_2**
  Table ronde pilotée par **Didier Bonijoly** (BRGM) avec la participation d'**Anne de Bethencourt** (Fondation Nicolas Hulot), **Daniel Clément** (ADEME), **François Clin** (BRGM), **Valérie Czop** (EDF)

  Débat avec la salle

17h30 - 18h00

Réflexions de clôture par **Laurent Michel**, Direction générale de l'énergie et du climat, MEDDE.

TOUS ENSEMBLE POUR LE CLIMAT
cop21.gouv.fr #COP21

Avec le concours de

ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES
POUR UN PROGRÈS RAISONNÉ, CHOISI ET PARTAGÉ

ONERC
Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie

RÉSUMÉ DES INTERVENTIONS

LES ENJEUX ET CONDITIONS DE L'ACTION
Présidence Christian KERT

Les leviers économiques et les politiques publiques du changement climatique
François Valérian (CGE)

Après un bref retour sur les principaux éléments du consensus au sujet du changement climatique, les outils économiques disponibles pour l'atténuation de ce changement sont passés en revue, avec les leurs limites et les problèmes théoriques qu'ils posent. La question du financement de l'atténuation est abordée sous l'angle des évaluations disponibles, mais aussi en évoquant quelques mécanismes proposés et surtout en la resituant dans la géopolitique des négociations.

Cette géopolitique permet en effet d'apprécier la singularité européenne en matière de politique publique de lutte contre le changement climatique, et de mieux définir les marges de manœuvre de l'Europe pour la conférence de Paris en décembre 2015.

Une vision technologique
Olivier Appert (président du Conseil français de l'énergie)

Les défis de l'énergie et de l'environnement sont étroitement liés. La technologie est un des leviers à mobiliser pour apporter des solutions.

Mais il faut se rappeler que les temps de l'énergie et de la technologie sont des temps longs. La transition vers un système énergétique durable prendra des décennies. Ainsi, d'après l'AIE, les énergies fossiles assureront encore 75% de l'approvisionnement énergétique mondial en 2040.

De nombreuses technologies sont envisageables. Mais il n'y a pas de panacée. De plus, toutes les technologies n'ont pas le même potentiel de déploiement ni la même maturité. Il faut élaborer des « road maps » réalistes prenant en compte le potentiel des technologies et leur dynamique spécifique de développement/déploiement.

Où en est la prospective du 21ème siècle
Table ronde pilotée par **Thierry Gaudin** (CGE, Prospective 2100) avec la participation d'**Eric Brun-Barrière** (ONERC, MEDDE), **Moussa Mbaye** (ENDA), **Vaia Tuuhia** (4D)

Eric Brun Barrière (ONERC, MEDDE)

Dans l'histoire de l'humanité, le changement climatique est un des rares domaines où les choix que la société devra faire dans les décennies à venir s'appuient sur une base scientifique solide. Depuis une trentaine d'années, le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Évolution du Climat (GIEC)

organise l'analyse collective des connaissances sur l'évolution passée et future du climat. Il a notamment identifié les risques associés au changement climatique, notamment dans le domaine des événements extrêmes, de l'agriculture, de la ressource en eau, de la montée du niveau des mers, de l'acidification des océans, de la biodiversité et de la santé.

La relation étroite établie dans le 5ème rapport du GIEC entre la température de la terre attendue à la fin du siècle et le cumul des émissions de CO2 depuis le début de l'ère industriel, associée aux niveaux de risques sur différents systèmes en fonction de la hausse de température attendue, permet aux décideurs de disposer d'un véritable outil d'aide à la décision. Celui-ci est au cœur des enjeux de la négociation engagée pour faire de la COP21 à Paris une étape clé dans la marche vers un objectif planétaire d'un développement durable.

Vaia Tuuhia (4D)

L'intervention portera sur le projet que 4D développe depuis 2 ans « Our Life 21 ». Ce projet trouve son essence dans le programme de recherche « transition vers une économie écologique ». Il part du constat que les gens ont besoin d'adhérer à un projet collectif, qui nourrit un nouveau récit, pour changer. Le 20ème siècle ne sera pas la reproduction du 21ème siècle. Nous serons de plus en plus nombreux. Les limites de la planète s'imposent. Le climat donne des horizons de temps. Et nous voudrons tous bien vivre. C'est l'histoire de cette équation que propose de raconter « Our Life 21 ». Qu'est ce que des vies réussies, durables et désirables, dès lors que l'on réussi la transition écologique. Et pour être dans l'actualité : dès lors que l'on réussit la négociation climat.

Cela se traduit par une description précise des usages d'énergie. On s'adresse aux personnes en leur parlant de ce à quoi sert l'énergie qu'ils consomment, on leur donne des repères sur leurs larges de manœuvre futur pour réduire ces usages et au cours d'ateliers, ils imaginent les futurs modes de vie de famille en 2030 et 2050 et nous les racontent.

Moussa MBaye (ENDA)

L'intervention portera sur les problématiques liées au projet APPECCAO sur l'adaptation des politiques et pratiques de pêche aux changements climatiques à l'aide des savoirs scientifiques et des connaissances endogènes. Sachant que les changements climatiques vont indubitablement bouleverser les activités liées à la pêche en milieu marin comme sur le continent en Afrique de l'Ouest. Ce secteur y fait vivre 3 millions de travailleurs cf. http://www.repao.org/index.php/appeccao/11-un-appec/28-menace-sur-l-outil-de-travail-de-3-millions-de-personnes, nous avons voulu favoriser une démarche prospective et anticipatrice autant chez les organisation de pêcheurs (pêche artisanale et industrielle), les techniciens, les chercheurs, etc., que chez les acteurs institutionnels en charge de la définition, de la mise en œuvre et du suivi-évaluation des politiques liées aux ressources halieutiques. En tirant profits des produits de recherche et de recherche-action réalisés dans ce projet, et en imaginant que les tendances notées n'ont pas été incurvées, l'intervention présentera 2 ou 3 courts récits quasi-imaginaires d'acteurs (pêcheur, leader d'ONG ou chercheur…) décrivant les situations vécues en 2030, avant de brosser à grand traits les efforts produits pour assurer une bonne prise en compte et anticipation des changements climatiques auprès de ces acteurs, le niveau d'aboutissement ainsi que les raisons d'espérer ou de douter à l'étape actuelle cf. http://www.repao.org/index.php/appeccao/11-un-appec/26-peche-et-changement-climatique-en-afrique-de-l-ouest-les-acteurs-definissent-des-strategies-commun.

LE CYCLE DU CARBONE ET SES COMPOSES : TROIS EXEMPLES CONCRETS DE CHAMPS D'ACTION

Présidence Guillaume BENOIT

Actions de réduction et projections des concentrations atmosphériques de CO2

Philippe Ciais (LSCE)

Les émissions de CO2 par les activités humaines, l'utilisation des sources d'énergie fossile et la déforestation est la principale cause du réchauffement climatique. Les émissions de CO2 ont fortement accéléré au cours de la décennie 2000 avec un taux moyen de croissance de 3.3% par an comparé à 1% par an pour les années 1990. Cette accélération reflète principalement le fort développement économique des pays émergents, surtout la Chine et l'Inde. La Chine est devenue le premier émetteur mondial en 2006. Le Global Carbon Project met jour régulièrement dans une publication à comité de lecture les estimations des émissions et puits de CO2 à l'échelle globale. En 2013, la Chine contribue à 28% des émissions globales, contre 14% pour les USA, 10% pour l'UE et 7% pour l'Inde. Pour la première fois les émissions par habitant en Chine ont même dépassées celles de la moyenne de l'UE avec un taux d'émission par habitant de 7.2 tCO2. Ces résultats sont publiés dans ESSDD (Lequéré et al. 2014) et mis en ligne sur le site web du Global Carbon Atlas (http://www.globalcarbonatlas.org/) avec plus de 88 contributeurs dans 68 organisations de recherche.

Si l'on compare la trajectoire récente des émissions de CO2 fossile avec les scénarios futurs produits par le GIEC, on constate sans ambigüité que nous suivons les scénarios les plus intensifs, qui ne sont pas compatibles avec un objectif de réchauffement sous 2°C, ni même sous 3°C. Un réchauffement de 2°C peut être assez linéairement relié au cumul des émissions de CO2 depuis la période pré-industrielle, et ce cumul est de l'ordre de 3200 milliards de tonnes de CO2, dont plus des 2/3 seront émis en 2020 si les émissions continuent d'augmenter au rythme actuel.

Les concentrations de CO2 observées dans l'atmosphère reflètent les émissions et la ré-absorption par l'océan et la végétation, qui sont des puits de carbone. Pour la première fois, la station de mesure de Mace Head représentative des concentrations moyennes des moyennes latitudes de l'hémisphère nord a enregistré une valeur supérieure à 400 ppm pendant plus de un mois en 2013, soit une augmentation de 227 ppm par rapport à 1750 à 395 ppm en 2013.

Les flux naturels de CO2 échangés avec la végétation et les océans varient en fonction du climat et du CO2 atmosphérique. Les flux échangés par la végétation et les sols sont de loin le plus incertains, et sont aussi sensibles à la gestion des écosystèmes, aux perturbations comme les incendies de forêts et au dépôt d'azote réactif. On sait qu'à l'échelle planétaire, l'océan absorbe environ 1/4 des émissions de CO2 et la végétation 1/4 mais il existe de grandes différences entre régions. Pour mieux comprendre où et comment se fait le stockage du carbone par les flux naturels, il est important de disposer d'observations globales et précises.

La présentation montrera différents scénarios d'émissions futurs, et les absorptions du carbone dans la végétation et l'océan, avec les incertitudes associées.

Sols, agriculture, élevage et sécurité alimentaire

Table ronde pilotée par **Guillaume Benoit** (Conseil général de l'agriculture) avec la participation de **David Crespo** (Président de Fertiprado), **Jean François Soussana** (INRA), **Bernard Tardieu** (Académie des technologies)

Problématique

Le changement en agriculture et dans notre rapport aux ressources rurales est une nécessité car il nous faut à la fois promouvoir une agriculture durable, assurer la sécurité alimentaire et relever le défi climatique.

1. L'agriculture et la sécurité alimentaire sont menacées par le changement climatique

Le dérèglement climatique menace l'agriculture et la sécurité alimentaire alors que la production agricole doit s'accroître de 60% d'ici 2050 (FAO, 2012). Le dernier rapport du GIEC annonce par suite une forte aggravation des problèmes. L'Afrique, l'Asie du sud et les populations vulnérables des zones arides, semi-arides et littorales sont notamment menacées. Les risques identifiés avec une « confiance élevée » sont relatifs à l'eau et à la perte des moyens de subsistance : « ruptures des systèmes alimentaires suite aux sécheresses et à la variabilité des pluies », « pertes de moyens de subsistance et de revenus suite à un accès insuffisant à l'eau d'irrigation et à la baisse de la productivité agricole »... Mais le problème est aussi européen et mondial. En effet, la stagnation observée des rendements en blé en France depuis les années 1990 est due au facteur climatique dans une proportion de 30 à 70% et, au niveau mondial, la baisse relative de rendement observée pour le blé est de 2% par décennie. Le 5ème rapport du GIEC conclut qu'on peut s'attendre à : i) des impacts tout au long du siècle en termes de sécurité alimentaire, ii) la multiplication des trappes à pauvreté dans les zones vulnérables, iii) une montée des prix mondiaux qui affectera les ménages, et iv) des migrations subies, des conflits et des risques pour l'intégrité de certains Etats. Dans le scénario tendanciel à + 4°C, c'est la sécurité alimentaire globale qui serait mise en grand danger.

2. Le « secteur des terres » est une clef de la lutte contre le changement climatique

Si l'agriculture doit produire bien davantage et s'adapter, elle doit aussi apporter sa contribution active à la lutte contre le dérèglement climatique. Le « secteur des terres » (l'agriculture/alimentation, la forêt et les sols, ainsi que les biofilières), s'il est émetteur de GES, est en effet un élément clef de la solution. Responsable de 24% du total mondial d'émissions (10 à 12 GtCO2eq/an), le secteur représente en effet « de 20 à 60% du potentiel total d'atténuation à l'horizon 2030 » (GIEC, 2014) car on peut mobiliser plusieurs leviers afin de :

- améliorer les mécanismes naturels faisant des productions des champs et des bois de véritables pompes à carbone, capables de le stocker puis de substituer des produits biosourcés (bois et autres bio-matériaux, bio-énergies..) à des énergies et à des matériaux de source minière beaucoup plus émissifs de GES, et de
- réduire la déforestation, l'étalement urbain, les pertes, gaspillages et mauvaises consommations alimentaires ainsi que les émissions directes de l'agriculture et de l'élevage (N2O et CH4).

« Stabiliser les concentrations de GES dans l'atmosphère à un niveau et dans un délai tel que … la production alimentaire ne soit pas menacée » (art 2 définissant l'objectif ultime de la CCNUCC) impose par conséquent de réussir à la fois la transition énergétique et un autre rapport à la terre. Ce qui est vrai pour le monde vaut aussi pour l'Europe. En France, le rapport du CGAAER « Les contributions possibles de l'agriculture et de la forêt à la lutte contre le changement climatique » a montré qu'en agissant sur la réduction des pertes et gaspillages alimentaires, en terres agricoles et en prairies, sur l'évolution des pratiques agricoles proposée par le rapport de l'INRA (gestion de l'azote, recours accru aux légumineuses, zéro labour, méthanisation, évolution de l'alimentation des bovins, gestion des prairies…), et sur une gestion plus dynamique de la forêt et la valorisation de l'effet de « substitution »-, c'est plus du ¼ de l'objectif d'atténuation fixé pour le pays en 2030 qui pourra être obtenu sans perte de production. L'objectif ne saurait être en effet de réduire la production car les déséquilibres entre offre et demande alimentaire mondiale, à l'origine de la crise de 2007-2008 et « des émeutes de la faim » qui sont suivies dans une quarantaine de pays, se verraient à nouveau accentués et la production perdue en Europe serait de facto externalisée ailleurs, dans d'autres régions du Monde, avec un risque presque certain de générer in fine un bilan climatique aggravé (impact indirect sur la déforestation). Ce serait donc une double absurdité, alimentaire et environnementale.

3. Changer avec le climat : quelles innovations ?

Changer avec le climat, c'est donc à la fois s'adapter, devenir plus résilients, et produire plus, plus de bio-produits, alimentaires et non alimentaires, mais aussi plus de services environnementaux, plus de stockage de carbone et plus de substitution. C'est réussir une intensification durable de l'agriculture. Comment faire ?

Le succès passe par de nouvelles visions –reconnaître l'importance des ressources rurales et mieux les préserver et valoriser- et par l'innovation technologique, agronomique, sociale, territoriale, politique. Ceci impose notamment de sortir des visions réglementaristes, normatives et standardisées pour innover et définir et promouvoir des solutions adaptées à chaque écosystème, à chaque territoire.

A l'échelle mondiale, les deux priorités de premier rang pour le secteur des terres sont la restauration des terres dégradées (par le surpâturage, l'érosion, la perte de matière organique…) et la préservation / gestion dynamique des forêts et filière bois. De nombreuses terres sont en effet aujourd'hui dégradées, notamment en Afrique, en Asie et en Méditerranée. Des solutions existent pour leur redonner vie, produire plus et permettre en même temps de stocker davantage de carbone. Et les restaurer peut permettre de réduire la déforestation et donc de réduire le déstockage : c'est en redonnant vie et production à ses terres dégradées que le Brésil réussit pour une bonne part à protéger la forêt d'Amazonie car ce qui est produit ici n'a pas à être produit là.

Il nous faut d'une façon générale mieux prendre soin des sols et de l'eau, et mieux valoriser la photosynthèse, éviter de mettre les sols à nu, mettre des plantes de couverture, des intercultures systématiques avec des légumineuses : tout cela permet un stockage de carbone et d'azote et d'utiliser moins d'intrants ; donc plus de matière organique, plus de production, moins d'émissions, plus d'atténuation et moins de charges. Et les systèmes, en devenant plus autonomes et plus diversifiés, gagnent aussi en résilience. C'est tout l'enjeu de la transition agro-écologique, du passage à une agriculture « écologiquement intensive ». Cela vaut aussi pour l'élevage qui peut mieux gérer l'herbe et devenir beaucoup plus autonome, moins dépendant des intrants. La technique des «

pâturages tournants dynamiques » en cours de développement par exemple en Vendée, est un bon exemple de système à gains multiples. Les éleveurs peuvent aussi modifier l'alimentation des bovins, équiper leurs fosses de torchère et mieux valoriser les déchets par la méthanisation.

La recherche, la formation et le conseil doivent aussi changer. Les coopératives peuvent renouveler leurs visions et vendre plus de conseil agronomique et moins d'intrants. Terrena et Vivescia s'y sont engagées. Les politiques doivent aussi innover, par exemple en définissant des stratégies d'adaptation et atténuation non dissociées des enjeux et stratégies de développement et de sécurité alimentaire, et en développant des politiques pro agriculture familiale et des systèmes de paiements pour services environnementaux. La société enfin doit prendre conscience de la montée des risques, soutenir intelligemment l'agriculture et arrêter d'en faire une variable d'ajustement des politiques commerciales, urbaines et environnementales, modifier aussi ses modes de consommations (étalement urbain, gaspillage alimentaire,…).

Enfin, la négociation climatique et les systèmes de rapportage devraient eux aussi évoluer pour mieux prendre en compte les enjeux de la sécurité alimentaire, du développement et du « secteur des terres ». Chaque pays devrait notamment s'attacher à mieux chiffrer ce qui est possible et des initiatives de coopération devraient être prises pour montrer qu'on peut réconcilier la sécurité alimentaire et la lutte contre le changement climatique.

Changer avec le climat : un enjeu majeur pour la forêt et le bois

Table ronde pilotée par **Jean-Luc Peyron** (GIP ECOFOR) avec la participation d'**Antoine Colin** (Institut national de l'information géographique et forestière IGN), **Estelle Vial** (Institut technologique FCBA)

Le changement climatique constitue pour le secteur de la forêt et du bois un enjeu majeur et double : il peut être atténué de diverses manières par une gestion appropriée de la forêt et des usages du bois ; mais cet effet reste subordonné à une adaptation significative aux impacts potentiels du changement climatique dont on présume qu'ils ne pourront être totalement évités. Atténuation et adaptation s'avèrent ainsi indéfectiblement liées, d'autant que le choix d'une gestion forestière en association à une stratégie industrielle agit forcément à la fois en termes d'atténuation et d'adaptation. Rares sont les secteurs qui apparaissent concernés de manière aussi équilibrée par ces deux grands types de mesures. Faire face au changement climatique consiste donc à se situer sous l'un ou l'autre de ces deux angles pour dégager des options ensuite évaluées du point de vue complémentaire à celui adopté ; une autre approche conduit à identifier des options résultant de tout autre point de vue (gestion durable des forêts, développement durable, économie circulaire) avant de les évaluer sous les deux angles complémentaires de l'atténuation et de l'adaptation.

Dans le cas de la forêt et du bois, atténuation et adaptation ont en commun de s'envisager sur le long terme puisque nombreux sont les jeunes arbres d'aujourd'hui qui devront subsister jusqu'à la fin du siècle et puisque l'utilisation de leur bois s'envisage à cette même échéance. Les décisions d'aujourd'hui se prennent donc en relation avec le changement climatique et la valeur du carbone de demain. De ce fait, les incertitudes sont grandes et imprègnent forcément les choix à faire. Comme le changement climatique, elles ne peuvent être totalement réduites et méritent donc aussi d'être gérées. La connaissance est encore lacunaire dans ce domaine et des progrès sont particulièrement attendus sur les deux axes de la réduction et de la gestion des incertitudes.

Au cours de cette table ronde, l'angle d'attaque sera principalement celui de l'atténuation, plus particulièrement de la lutte contre l'effet de serre. Mais la question des impacts du changement climatique surgira forcément. Seront présentés deux aspects des études et recherches sur la contribution de la forêt et du bois à la lutte contre l'effet de serre, l'un sur la forêt, l'autre sur le bois. Ce double état des lieux permettra de mettre en évidence les différentes facettes de la contribution des forêts à l'atténuation du changement climatique, avec les questions qui se posent, les arbitrages à effectuer, les questions à approfondir.

La contribution de la filière forêt-bois à l'atténuation du changement climatique intervient à travers plusieurs grands facteurs sur lesquels repose le climat : le cycle de l'eau (évapotranspiration), l'énergie (albédo) et le cycle du carbone qui joue à travers le méthane, les composés organiques volatils et, surtout, le dioxyde de carbone qui sera principalement considéré ici. Même considérée du seul point de vue du dioxyde de carbone, elle continue à revêtir plusieurs aspects : en forêt d'abord avec le changement d'occupation des terres et l'évolution du stock de carbone dans les peuplements en croissance, dans le bois mort et dans les sols ; du fait ensuite des utilisations du bois qui induisent une variation du stock de carbone dans les produits en bois et des émissions évitées de gaz à effet de serre par la substitution de bois à d'autres matériaux (substitution matériau) et à d'autres énergies (substitution énergie).

L'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) assume le suivi des ressources en bois à travers sa composante inventaire forestier et fournit au Centre interprofessionnel technique de la pollution atmosphérique (CITEPA) une bonne partie des éléments nécessaires au rapportage de la France dans le cadre de la convention "Climat" et de son Protocole de Kyoto. A travers la simulation de l'évolution du bilan carbone des forêts françaises au cours des prochaines, années, il sera ainsi possible d'apprécier l'ampleur du puits de carbone forestier et de discuter son évolution future sous divers scénarios de récolte de bois.

La prise en compte des utilisations du bois invite quant à elle à analyser le cycle de vie des produits pour mesurer les effets de substitution, les améliorer à travers une gestion adaptée, identifier l'ensemble des voies de progrès. L'Institut technologique forêt, cellulose, bois construction, ameublement (FCBA) présentera cette problématique avec les éléments dont on dispose aujourd'hui et ceux qui sont travaillés à l'intérieur de divers programmes de recherche conduits avec des partenaires français et européens. L'analyse de cycle de vie (ACV) permet d'évaluer les bénéfices potentiels de substitution (matériau ou énergie). Elle établit pour cela le bilan des émissions de gaz à effet de serre d'origine fossile sur l'ensemble du cycle de vie des produits. Elle compare ensuite ce bilan à celui de matériaux ou énergies dominants sur le marché. L'approche analytique du bilan d'un service par un produit bois, doit donc se compléter d'une connaissance du marché pour poser un scénario de substitution des produits de référence. A cette condition, un impact régional de substitution peut être calculé.

Finalement, le bilan carbone du secteur de la forêt et du bois est important et annule de l'ordre de 10 à 20% des émissions françaises de gaz à effet de serre. Il repose à la fois sur un puits de carbone forestier et sur des effets de substitution qui permettent d'éviter des émissions de carbone fossile tout en étant susceptibles de se combiner entre eux et avec un stockage de carbone dans les produits. Le puits de carbone forestier tend à augmenter en raison de la structure des âges de la forêt française, de son extension constante depuis de nombreuses années et d'un prélèvement faible de bois en regard de la production biologique nette. Il pourrait cependant décroître à l'avenir du fait d'une augmentation des risques et de la mortalité, ainsi que d'un renforcement des prélèvements de

bois qui correspond à une gestion plus durable de cette ressource renouvelable. Cette diminution du puits due à une augmentation des prélèvements peut être compensée, quant à elle, par des effets de stockage et de substitution des produits en bois pour peu que l'exploitation des forêts soit proportionnée à cet objectif. Les analyses bibliographiques montrent qu'un ordre de grandeur de ces effets de substitution est actuellement pour la fabrication d'un produit en bois de 1 tonne CO2eq. par m3 de bois contenu dans le produit et pour une utilisation énergétique de 0,5 tonne CO2 eq. par m3 de bois.

Séparation, séquestration et valorisation du CO_2

Table ronde pilotée par **Didier Bonijoly** (BRGM) avec la participation d'**Anne de Bethencourt** (Fondation Nicolas Hulot), **Daniel Clément** (ADEME), **François Clin** (BRGM), **Valérie Czop** (EDF)

Le Captage, le Stockage du Carbone et sa Valorisation (CSCV) est une des solutions permettant de contribuer à la réduction des émissions de CO2 dans l'atmosphère. Cette solution technologique s'adresse aux seules émissions concentrées issues de l'industrie intensive en Carbone comme la production d'électricité à partir des combustibles fossiles, la sidérurgie, les cimenteries…

Ces industries représentent à elles seules 65% des émissions mondiales de CO2 (émissions totales : 36,1 milliards de tonne en 2013). Si toutes les industries se sont engagées dans une démarche d'amélioration de l'efficacité énergétique de leurs opérations, de préparation à la transition énergétique (réduction de l'usage des combustibles les plus carbonés, voire leur remplacement par des énergies renouvelables), il n'en reste pas moins que le CSCV offre une solution viable et efficace pour celles qui resteront fortement émettrices de CO2 ou dont l'usage d'un combustible est intrinsèquement irremplaçable.

Cependant, la mise en œuvre du CSCV ne peut s'envisager que sous certaines conditions :

- Les industriels ont besoin de disposer d'un cadre réglementaire et financier stable et garanti sur le long terme pour investir,

- Ils ont besoin que ce cadre réglementaire soit défini à une échelle mondiale pour éviter une concurrence déloyale en particulier pour les produits marchands exportables (comme l'acier par ex.)

- Ils ont besoin de disposer de garanties sur les capacités de stockage disponibles

Concernant les incitations financières, rappelons que le marché européen du Carbone n'a pas fonctionné comme espéré. La tonne de CO2 n'est valorisée qu'à 7€ ce qui est insuffisant pour justifier l'implantation de CSC (min 50€/t) qui par ailleurs ne bénéficie d'aucune aide, type tarifs de rachat. Il faut donc un marché européen qui fonctionne et, au-delà, une harmonisation des marchés à l'échelle mondiale pour éviter de pénaliser les industries à haute intensité énergétique européennes.

Pour la France, l'atteinte du facteur 4 défini dans le Plan Climat dès 2008, serait réalisable d'autant plus facilement que le CSCV serait mis en œuvre (projet ANR SOCECO2). On rappelle que les émissions de GES s'établissaient en 2012 à 490 Mt CO2eq., soit 67 Mt de moins qu'en 1990, année de référence (557.4 Mt CO2éq.). Mais on est encore loin d'une division par 4.

Aujourd'hui, il parait difficile de mettre en œuvre le stockage de CO2 à terre. En effet, les populations ne sont pas prêtes à accepter des stockages sur leur territoire. Cette situation implique a nécessité de gérer le stockage à une échelle internationale (européenne), le CO2 capté serait transporté et stocké là ou des capacités disponibles existent dans le sous-sol sans conflit d'usage avec les activités humaines (en Mer du Nord par exemple.

Une telle situation pourrait paraitre bloquée si de nouveaux concepts n'étaient apparus voici 2 ou 3 ans, axés sur la valorisation du CO2. Le CO2 pourrait être considéré comme une matière première laquelle permettrait de développer une nouvelle industrie chimique. Cette solution alternative pourrait répondre à 4 ou 5% du problème, ce qui est tout à fait significatif au regard du CCS dont la contribution a été estimée par l'AIE à hauteur de 14% en 2012.

Le concept consiste à donner une triple valeur au CO2 : une valeur environnementale, une valeur économique et une valeur sociétale grâce à la mise en œuvre de procédés physiques ou par transformations chimiques ou biologiques

Enfin, de nouvelles questions émergent qui nécessitent un changement radical de paradigme. Et si la géo-ingénierie environnementale pouvait proposer des solutions permettant d'atténuer les effets négatifs de la croissance économique et/ou d'évoluer vers un développement plus durable ?

Bien que controversée, sa mise en œuvre ne peut être écartée a priori. C'est l'objet de l'atelier de réflexion prospective Réagir qui déjà, a identifié un certain nombre de solutions dont la mise en œuvre nécessiterait un changement radical de notre conception de l'économie du CO2.

Le premier concept consiste à proposer la résorption du CO2 atmosphérique comme une prestation technique de dépollution globale indépendante des filières industrielles, notamment celles dépendant des énergies carbonées, offrant à la gouvernance internationale un référentiel financier physiquement objectif au travers de solutions pratiquement accessibles. De plus, les opportunités de sites de capture délocalisée et de séquestration ultime du CO2 en seraient très fortement multipliées et optimisées.

Le second concept, consiste, dans ces opérations, à combiner la production, notamment grâce à des énergies décarbonées, de flux chimiques de bases fortes réactives avec le CO2 atmosphérique à une gestion dissociée des flux acides correspondants (CO2 d'origine minérale ou autres acides minéraux plus forts). Ces pratiques sont alors proches des industries minérales (eau, minerais) susceptibles de les accompagner, quand elles ne les ont pas déjà intégrées dans leurs projets innovants notamment en hydrométallurgie.

C'est de toutes ces questions dont il sera question lors de la table ronde organisée par l'AFPCN et sur lesquelles le débat avec le public sera engagé.

BIOGRAPHIES DES INTERVENANTS

François Valérian (CGE)

François Valérian est ancien élève de l'école polytechnique, ingénieur du corps des mines et docteur en histoire. Il est l'auteur de plusieurs ouvrages et articles sur des sujets économiques, historiques ou financiers. Il est aussi ancien associé du cabinet Accenture.

Olivier Appert (président du Conseil français de l'énergie)

Olivier Appert préside le Conseil Français de l'Energie, Comité français du Conseil Mondial de l'Energie. Il est Délégué général de l'Académie des Technologies.

Olivier Appert, ancien élève de l'Ecole polytechnique, ingénieur général des Mines, a commencé sa carrière au service des Mines de Lyon, puis a occupé différents postes au ministère de l'Industrie et au cabinet du Premier Ministre. En 1987, il a pris la responsabilité de l'activité radiocommunication mobile au sein de la société Télécommunications Radioélectriques et Téléphoniques (TRT). Nommé en 1989 directeur des hydrocarbures au ministère de l'Industrie, il a rejoint en 1994 la direction de l'IFP et a été en charge notamment de la recherche et développement et de sa filiale, holding technologique cotée en Bourse. Il a été nommé en octobre 1999 directeur de la coopération long terme et de l'analyse des politiques énergétiques au sein de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE). De 2003 à avril 2015, il a été Président Directeur Général de l'IFP Energie Nouvelles.

Thierry Gaudin (CGE, Prospective 2100)

Né le 15 mai 1940, il est ingénieur Général des Mines honoraire et président de « Prospective 2100 ».

Dix ans au Ministère français de l'Industrie (1971-1981), en charge de la construction d'une Politique d'Innovation : création du "six countries program on innovation policies" avec les collègues d'Allemagne, Angleterre, Irlande, Hollande, Suède, étendu ultérieurement à d'autres pays (http://6cp.net) débuts du Capital Risque, Constitution des Agences régionales d'Information Scientifique et Technique, création et organisation du salon Inova, Mise en place d'enseignements du Design, Réseaux régionaux recherche-industrie, Réforme de l'ANVAR, devenue depuis Oséo puis intégrée dans la BPI…

Dix ans (1982-1992) fonde et dirige le Centre de Prospective et d'Evaluation du Ministère de la Recherche et de la Technologie : Veille Technologique internationale (Silicon Valley, Japon…), Evaluation de l'efficacité des Recherches et grands programmes technologiques, Elaboration d'une prospective mondiale du siècle prochain, publiée en 1990 et 1993 chez Payot sous le titre "2100, récit du prochain siècle" (65000 exemplaires).

Création de Prospective 2100, association internationale ayant pour objectif de préparer des programmes planétaires pour le 21° siècle, dont il assume la présidence.

Depuis 2005 : retraité, membre associé du CGEIET (Conseil Général des Mines).

Eric Brun-Barrière (ONERC, MEDDE)

Né le 31-12-1959. Diplomé de l'Ecole Polytechnique et de l'Ecole Nationale de la Météorologie, doctorat de l'Université Paris-Est.

De 1984 à 1989, Eric Brun chercheur au Centre d'Etudes de la Neige (CEN), à Grenoble.

De 1989 à 1998, Directeur du CEN. Spécialiste de la neige et des avalanches et pionnier dans le domaine de la modélisation numérique du manteau neigeux en fonction des conditions météorologiques. Étude des impacts du changement climatique sur l'enneigement.

De 2003 à 2009, Directeur de la Recherche de Météo-et Directeur et du Centre National de Recherche Météorologiques (CNRM).

De 2009 à 2014, Chercheur dans le Groupe Climat du CNRM sur les interactions neige/climat.

Depuis 2015, Chargé de Mission à l'ONERC au sein du Ministère de l'Écologie, du développement durable et de l'énergie.

Ancien Vice-Président de l'International Commission on Snow and Ice (IUGG).

Ancien Président de l'International Glaciological Society (2008 à 2011).

Président du Conseil d'administration de l'Institut polaire français Paul-Emile Victor (IPEV).

Président du conseil scientifique de l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL).

Moussa Mbaye (ENDA)

Secrétaire exécutif du réseau mondial ENDA Tiers monde depuis 2013, il fut précédemment coordonnateur de l'Association Enda Diapol (Prospectives Dialogues Politiques), qui vise à renforcer la participation des acteurs périphériques dans la définition, la mise en œuvre et le suivi-évaluation des politiques en Afrique de l'Ouest. Il dispose d'une expérience de vingt ans centrée sur l'analyse des processus de structuration des sociétés civiles et de leurs interactions avec les pouvoirs publics, aussi bien en tant qu'expert qu'en tant qu'acteur. Il s'investit dans la facilitation de dialogues politiques et dans l'animation de processus visant à une transformation de la culture politique au niveau national ou local. Il a supervisé et rédigé le rapport de plusieurs processus de recherche sur les capacités et défis de la société civile, notamment, pour le Sénégal, l'Indice CIVICUS, un projet de recherche-action qui vise à faire l'état des lieux de la société civile dans les pays à travers le monde (coordonné par l'Alliance Mondiale pour la Participation Citoyenne). M. Mbaye est Président du Conseil d'Administration du REPAO (Réseau sur les Politiques de Pêche en Afrique de l'Ouest). Il est membre du Comité scientifique du Forum Mondial Sciences et Démocratie et est à ce titre impliqué dans l'organisation du Forum Social Mondial. Il est membre et rapporteur de la Commission nationale de réforme des Institutions (République du Sénégal) et a été le Président du Comité scientifique de l'Université des AnE (Acteurs non Etatiques) édition 2013.

Vaia Tuuhia (4D)

Déléguée générale de l'association 4D, Vaia Tuuhia conduit les projets internationaux au sein de 4D, avec toujours l'envie qu'une solution collective émerge des négociations multilatérales, des pratiques des territoires, des mouvements citoyens, de l'engagement de tout à chacun. Décrypter,

démontrer, faire se rencontrer… C'est toujours par plus de transversalité, en stimulant la créativité ou encore par la synergie des capacités d'action des uns et des autres que nous ferons ce saut qualitatif pour le développement durable. Elle suit plus particulièrement les partenariats avec les syndicats, les ONG environnementales et de solidarité internationales. A été membre du débat national de la transition énergétique, est membre du conseil national du développement et de la solidarité internationale ainsi que de la plateforme RSE. Avant de rejoindre 4D, elle représentait la Polynésie française auprès de l'UE.

Philippe Ciais (LSCE)

Philippe Ciais est chercheur au Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement LSCE-IPSL (CEA CNRS UVSQ). Sa recherche porte sur le cycle du carbone et les gaz à effet de serre. Il est auteur de plus 400 publications de Rang A dont environ 40 dans des revues du groupe Nature, Science ou PNAS, et a dirigé ou co-dirigé les travaux de 50 étudiants en thèse.

P. Ciais a coordonné plusieurs projets de recherche européens et internationaux dont la préparation de ICOS, une infrastructure de recherche pour le suivi des flux de gaz à effet de serre du continent européen. Membre du GIEC depuis 2001, auteur co-ordinateur du chapitre 6 du 5ème rapport du GIEC «Carbon and other biogeochemical cycles ». Il est co-lauréat d'un grant ERC-Synergie obtenu en 2014 sur les interactions entre cycles du phosphore et du carbone, et plus récemment d'un poste de "Yang-tze professor" invité à l'Université de Pékin.

Guillaume Benoit (Conseil général de l'agriculture)

Guillaume Benoit est ingénieur général des ponts, des eaux et des forêts, membre du Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux (CGAAER). Après avoir été commissaire de la DATAR à l'île de la Réunion et directeur du Parc national des Cévennes, il a dirigé pendant 8 ans le centre régional du Plan Bleu (PNUE/PAM) et piloté le 2ème grand exercice de prospective sur l'environnement et le développement dans le Bassin méditerranéen (Earthscan, 2005), puis a été conseiller du président du Conseil général du développement agricole du Maroc (CGDA). Au CGAAER depuis 2010, il est l'auteur du rapport « L'eau et la sécurité alimentaire : défis et solutions », produit par la France pour le 6ème Forum mondial de l'eau et préfacé par la FAO, ainsi que le co-auteur du rapport « Les contributions possibles de l'agriculture et de la forêt à la lutte contre le changement climatique » (CGAAER, 2015). Il préside le groupe « eau et sécurité alimentaire » du Partenariat français pour l'eau, et est rapporteur général des séminaires internationaux SESAME dont la 3ème édition tenue en février 2015 à Paris, a porté sur « La sécurité alimentaire et le changement climatique en Méditerranée et Afrique de l'Ouest : quel agenda d'action pour la COP 21 ? ».

David Crespo (Président de Fertiprado)

David Gomes Crespo est le fondateur et président de la société FERTIPRADO. Ingénieur agronome à l`Institut Supérieur d`Agronomie, Université de Lisbonne, D. Crespo a été chercheur de l`Institut national de recherches agronomiques et chef du Département de Pâturages et Cultures Fourragères de la Station d`amélioration des Plantes, président du Programme autonome pour le développement des productions agricoles et animales du Ministère de l`Agriculture et professeur invité aux Universités de Lisbonne, Evora et Açores. Il a fondé et présidé l`Association Portugaise de Pâturages et Fourrages, et a poursuivi sa carrière à la FAO (Rome) comme spécialiste en ressources pastorales et fourragères. Il a présidé aussi à la Fédération Européenne des Herbage et au Comité de continuité du Congrès international des herbages. Il a conçu et développé le concept des « Prairies et cultures

fourragères bio-diverses riches en légumineuses », aujourd'hui en expansion dans des différents pays méditerranéens.

Jean François Soussana (INRA)

Jean-François Soussana est directeur scientifique 'Environnement' à l'Inra et directeur de recherche. Il a dirigé pendant 8 ans une unité de l'Inra sur les agro-écosystèmes et le changement global. Depuis 1998, il est membre du Groupe de travail II du GIEC (Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat) sur les impacts du changement climatique, l'adaptation et la vulnérabilité. Il a été auteur principal des rapports d'évaluation du GIEC dans le domaine de l'agriculture, des forêts et des écosystèmes. Il coordonne un grand projet européen (FP7) sur l'élevage et le changement climatique impliquant quatre continents, préside le conseil scientifique de l'initiative de programmation conjointe sur l'agriculture, la sécurité alimentaire et le changement climatique (FACCE JPI, 21 pays), dirige un groupe de l'Alliance mondiale de recherche sur les gaz à effet de serre agricoles (45 pays) et est co-président du comité de pilotage du programme international AgMIP concernant les impacts du changement climatique sur l'agriculture. Il a présidé le comité scientifique de la troisième 'Conférence mondiale sur l'Agriculture Intelligente face au Climat' et est l'un des organisateurs de la conférence scientifique 'Notre avenir commun face au changement climatique'.

Bernard Tardieu (Académie des technologies)

Bernard Tardieu est Président de la Commission « Energie et Changement climatique » de l'Académie des Technologies. Il est co-auteur du rapport « Le méthane : d'où vient-il et quel est son rapport avec le climat ? ». Expert international dans le domaine de l'hydroélectricité, des barrages, des canaux et du génie civil des centrales nucléaires, B Tardieu est président d'honneur de Coyne et Bellier-Tractebel Engineering société de GDF-Suez. Au sein de cette société, puis à sa tête, il a consacré sa vie professionnelle à développer des grands projets dans le domaine de l'eau et l'énergie hydroélectrique, dans une cinquantaine de pays et a promu la recherche théorique et pratique à l'occasion des expertises et chantiers des barrages. Il a été Vice-Président de la Commission Internationale des Grands barrages, Président du Comité Français des Barrages et Réservoirs, Vice-Président du Comité d'orientation de la Recherche en Génie Civil (1985-1995), membre du CS d'IRSTEA. Il est membre du Comité Technique Permanent des Barrages et Ouvrages Hydrauliques, membre du Conseil Scientifique de l'EDF et de l'ENPC, Président du CST « ouvrages » du Canal Seine Nord Europe- VNF.

Jean-Luc Peyron (GIP ECOFOR)

Jean-Luc PEYRON est ingénieur général des ponts, des eaux et des forêts. Il dirige le groupement d'intérêt public ECOFOR constitué entre une douzaine de grands organismes français de recherche, développement, suivi, administration et gestion, au profit des écosystèmes forestiers tempérés et tropicaux. ECOFOR anime des programmes de recherche et des expertises en renforçant les contacts entre producteurs et utilisateurs de connaissances.

Jean-Luc Peyron est également membre du Conseil d'administration de l'Union internationale des instituts de recherche forestière (IUFRO), membre du Comité de gestion de l'EraNet européen SUMFOREST sur la gestion forestière durable et multifonctionnelle, et membre correspondant de l'Académie d'agriculture de France.

Antoine Colin (IGN)

Antoine Colin est ingénieur forestier à la direction interrégionale Nord-Est de l'IGN à Nancy. Spécialiste de l'utilisation des données de l'inventaire forestier national (IFN), il est en charge depuis 2004 de l'analyse des ressources forestières, de l'évaluation des disponibilités futures en bois, et de l'estimation du puits de carbone de la forêt, aux échelles nationales et des territoires. Il a finalisé en 2014 une étude sur l'évolution du puits de CO2 de la forêt française en fonction de différents scénarios de récolte de bois en forêt (étude commandée par la DGEC du MEDDE). Il réalise actuellement pour le compte de l'ADEME une étude visant à estimer les quantités de bois d'œuvre, industrie et énergie disponibles en France à l'horizon 2035. Il est membre depuis 2005 du réseau européen des inventaires forestiers nationaux qui œuvre à l'harmonisation des résultats d'inventaire forestier pour les rapportages internationaux sur la forêt, et notamment le rôle d'atténuation de l'effet de serre.

Estelle Vial (Institut technologique FCBA)

Estelle Vial travaille depuis 8 ans au pôle Environnement Santé de l'institut technologique FCBA (Forêt, Cellulose, Bois construction, Ameublement). Elle est spécialisée dans l'analyse de cycle de vie de produits bois et participe à ce titre à des projets de recherche européens et français d'évaluation de la filière forêt bois par rapport au changement climatique.

Didier Bonijoly (BRGM)

Didier Bonijoly est docteur en Géologie. Ayant 30 ans d'expérience, il est spécialisé dans la géologie des bassins sédimentaires, la géologie structurale et la géophysique.

Depuis 2005, il coordonne les activités de R&D BRGM dans le cadre des projets de démonstrateurs de stockage de CO2. Il fait également partie du groupe technique du Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF), en charge de définir la proposition de normes pour l'évaluation des capacités de stockage géologique du CO2 et de conduire un groupe de travail dédié à "l'intégrité et la sécurité" des stockages (2009).

Il devient le chef du Service « Géologie » en 2009 puis est nommé directeur adjoint de la division des GéoRessources en 2012, division en charge de l'acquisition, de la conservation et de la production de données et modèles dans les domaines de la géologie, de la géothermie et des ressources minérales, et du développement d'outils, techniques et modèles dans ces trois domaines.

Didier Bonijoly est membre du groupe d'experts en GéoEnergie au sein de l'association des Services Géologiques Européens (GEEG/EGS), membre du groupe de travail « Combustibles fossiles non conventionnels » auprès de la DGENV (Commission européenne), membre de l'Association Euracoal (Comité Environnement), délégué pour la France au sein du Working Party for Fossil Fuel (Agence Internationale de l'Energie) et du CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum), représentant du BRGM au ClubCO2.

Didier Bonijoly est administrateur de la société GEOGREEN.

Anne de Bethencourt (Fondation Nicolas Hulot)

Responsable Economie Circulaire à la Fondation Nicolas Hulot, Vice-présidente de l'Institut de l'Economie Circulaire et membre du Conseil Economique Social et Environnemental.

A la Fondation Nicolas Hulot, elle est en charge des travaux liés aux nouveaux modèles de production, vente et consommation vers une économie circulaire à impact positif. Elle supervise une étude sur la valorisation du CO2 avec l'école Centrale Paris

A l'Institut de l'Economie Circulaire, elle anime le groupe de travail "Economie de la fonctionnalité et performance d'usage".

Daniel Clément (ADEME)

Daniel CLÉMENT, 60 ans, est Docteur en énergétique et Directeur Scientifique Adjoint de l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) depuis 2010. Il était précédemment (depuis 2004) Directeur de la Recherche et, de 2001 à 2004, responsable du développement de la gestion des connaissances et des techniques d'information et de communication après avoir été, de 1992 à 2001, chef du service programmation de la recherche de la même Agence.

De 1999 à 2004, coordinateur du réseau de recherche et d'innovation sur les piles à combustible (réseau PACo).

Il a notamment contribué, en tant qu'expert, à des travaux du Plan, de l'Observatoire des Sciences et des Techniques, de l'Agence Internationale de l'Energie, de la Commission Européenne…

De 2005 à 2011, responsable de l'unité support ANR au sein de l'ADEME.

Commissaire scientifique, avec Pierre Papon de la nouvelle exposition permanente sur l'énergie de la cité des sciences à La Villette, il est co-auteur, avec ce dernier, de l'ouvrage : vers une énergie durable ? aux éditions du Pommier.

Membre de conseils scientifiques et de comités recherche (CNRS, Ifsttar, écoles des mines,…), il préside depuis 2012 le Club CO2 qui réunit les principaux acteurs de la capture, stockage et valorisation du CO2.

François Clin (BRGM)

François CLIN est ingénieur géologue diplômé de l'Ecole de Géologie de Nancy (ENSG 1973).

La phase principale de sa carrière technique s'est déroulée au BRGM dans le domaine de la R&D en valorisation des matières premières minérales et secondaires (notamment initiateur des recherches nationales dans le domaine de l'économie circulaire dès le début des années 1970).

A partir de 1990, il assure des fonctions d'administration scientifique au Ministère en charge de la Recherche dans le champ de l'énergie, des ressources minérales et de l'environnement. Elles s'y achèvent en 2010 comme directeur adjoint du secteur scientifique « Energie, Développement Durable, Chimie et Procédés ».

Il rejoint alors les directions en charge de la stratégie au CEMAGREF puis depuis 2011 du BRGM. Il est à ce jour responsable de l'Evaluation scientifique et technique au BRGM et rédacteur en chef de la revue « Géosciences ».

Valérie Czop (EDF)

Ingénieur ENSTA, Valérie Czop est entrée à la R&D d'EDF en 1982, pour étudier les générateurs de vapeur de SUPERPHENIX. Elle est ensuite passée à l'ingénierie nucléaire avant de rejoindre

l'ingénierie du parc Thermique à Flamme. Elle est maintenant rattachée à l'Etat-Major de la Division Production et Ingénierie du Thermique à Flamme, où elle pilote (entre autres) le programme Captage et Stockage de CO2 du groupe EDF. Elle représente EDF au sein du Club CO2, où elle anime le groupe de travail communication.

ANNEXES

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE
DE L'AGRICULTURE
DE L'AGROALIMENTAIRE
ET DE LA FORÊT

CGAAER
CONSEIL GÉNÉRAL
DE L'ALIMENTATION
DE L'AGRICULTURE
ET DES ESPACES RURAUX

L'agriculture et la forêt
Des solutions face au défi climatique ?
Quelles contributions possibles ?

mars 2015

Synthèse du rapport du CGAAER n°14056 : « Les contributions possibles de l'agriculture et de la forêt à la lutte contre le changement climatique »

Le contexte

La question agricole et forestière, imparfaitement prise en compte depuis l'origine même du Protocole de Kyoto, est probablement appelée à prendre une importance croissante dans la future négociation sur le Changement climatique qui se tiendra à Paris en décembre 2015 (COP 21).

En effet :

- Les deux secteurs agricoles et forestiers sont « crédités » de 24 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES).
- Les productions des champs et des bois, si elles sont effectivement émissives de GES, sont d'abord, grâce à la photosynthèse, de véritables pompes à carbone efficaces, sobres en énergie et créatrices de valeur et d'emplois. Elles constituent ainsi des amortisseurs uniques et efficaces de la dérive climatique de la planète.
- L'agriculture et la forêt sont et seront fortement impactées par le changement climatique, ce qui pourrait réduire leur capacité à capter du carbone atmosphérique et même à mettre en péril la sécurité alimentaire mondiale avec des risques accrus de migrations et d'instabilités régionales. Les stratégies possibles d'atténuation du changement climatique par l'agriculture et la forêt sont donc étroitement liées aux capacités d'adaptation et de résilience des systèmes agricoles et forestiers.

Si l'agriculture et la forêt sont concernées au premier chef par la question climatique, les enjeux de réduction des émissions de gaz à effet de serre ne sont pas les seuls défis pour notre planète : l'agriculture sert ainsi d'abord à nourrir les hommes, et nous serons bientôt 9 milliards. Beaucoup vivront dans des régions contraintes par la pénurie d'eau et qui seront donc dépendantes d'importations alimentaires croissantes.
Comme la forêt, l'agriculture aura de surcroît un rôle important à jouer pour substituer dans nos consommations des bio-produits (matériaux, chimie, énergies…) renouvelables à des produits issus de sources fossiles ou minérales en voie d'épuisement. Il nous faudra donc produire plus et mieux, en agriculture comme en sylviculture. Une intensification agricole et forestière intelligente est d'ailleurs un impératif pour réduire la déforestation, facteur important d'émissions de GES.

Cependant, nos sociétés largement urbanisées ont peu conscience des services vitaux que l'agriculture et la forêt, productives, renouvelables et durables, ainsi que leurs bio-filières à l'aval, rendent et pourraient rendre plus encore à la planète et à l'humanité. L'agriculture et la sylviculture constituent donc un élément majeur de la solution climatique planétaire, tout comme elles permettent d'affronter le défi alimentaire mondial.

Faire face au défi mondial de l'atténuation du changement climatique

L'accélération de l'évolution climatique est due aux émissions de gaz à effet de serre (CO_2, CH_4 et N_2O principalement) générées par les activités humaines. Les principaux secteurs d'activité responsables de cette accélération sont l'énergie, l'industrie et les transports, sachant que les émissions dues à

l'agriculture et à la déforestation sont plus limitées et se sont stabilisées.

Les émissions annuelles mondiales de CO_2 (38 Gt/an[1]) sont majoritaires, et elles sont pour l'essentiel la conséquence directe de la combustion d'énergies fossiles. Ces émissions sont cependant compensées pour une part par le stockage additionnel et régulier de carbone dans les océans (8,4 $GtCO_2$/an), dans les sols et dans la biomasse terrestre (9,5 $GtCO_2$/an)[2].

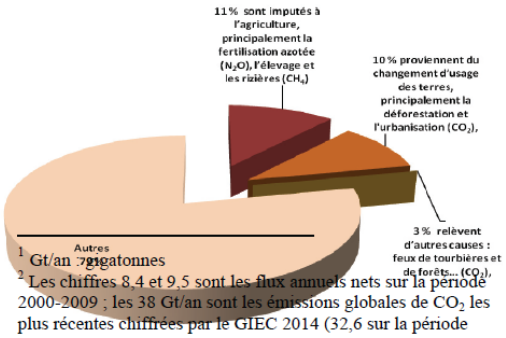
Agriculture, forêt et sols : un nouveau « secteur des terres »

La capacité photo-synthétique de l'agriculture et de la forêt offre donc d'importantes possibilités d'atténuation des émissions nettes de GES. Les bio-filières de l'aval, (bois et fibres, agro-industries, chimie du végétal, néo-matériaux, bioénergies...) viennent encore amplifier ces sources d'atténuation des émissions nettes de GES en prolongeant dans le temps le stockage du carbone d'une part (dans le bois notamment) et en substituant d'autre part des produits bio-sourcés sobres à des produits conventionnels très émissifs de GES (bétons, métaux, hydrocarbures, chimie fossile).
L'agriculture et la forêt de production jouent donc, et joueront plus encore à l'avenir, un rôle notable d'amortisseur efficace du changement climatique.

État des lieux

Le dernier rapport du GIEC[3] a d'ailleurs reconnu l'importance globale du « secteur des terres » (AFOLU en anglais ; il regroupe l'agriculture, la forêt, les sols et l'usage des terres), pour une comptabilisation intégrée des GES. Les émissions de GES de ce secteur des terres élargi sont évaluées, sous certaines réserves qui sont développées ci-après, à 24 % des émissions mondiales :
Ces données sont toutefois à relativiser car les critères de calcul présentent encore de très fortes incertitudes. En outre, la substitution de produits biosourcés à des bases fossiles en aval n'y est pas prise en compte, tandis que l'artificialisation des sols, due notamment à l'étalement urbain est à l'origine de déstockage de carbone comptabilisé dans le secteur de l'agriculture, plutôt que dans celui de l'habitat par exemple.

Gaz à effet de serre du « secteur terres »



[1] Gt/an : gigatonnes
[2] Les chiffres 8,4 et 9,5 sont les flux annuels nets sur la période 2000-2009 ; les 38 Gt/an sont les émissions globales de CO_2 les plus récentes chiffrées par le GIEC 2014 (32,6 sur la période 2000-2009).
[3] GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

Un réel potentiel

Passer alors de la tendance climatique actuelle de référence (+ 3,7 à + 4,8°C de réchauffement planétaire en 2100) au scénario qui est souhaitable (pas plus de + 2°C) supposerait de pouvoir réduire globalement de 40 à 70 % les émissions de GES d'ici 2050 par rapport à 2010. Le défi à relever est donc considérable. Il passera d'abord par la réussite rapide de la transition énergétique.

Cependant, compte tenu de ses spécificités photosynthétiques, le secteur des terres (agricole et forestier) a, dans le même temps, un rôle stratégique majeur à jouer. En combinant et en optimisant les mesures développées ci-après, il pourrait amortir une part importante (20 à 60 %) des émissions planétaires de GES d'ici 2030, puis 2050 : réduction des émissions agricoles, augmentation de la séquestration de carbone dans les sols et les produits de la biomasse, substitution de produits bio-sourcés à des produits et des hydrocarbures conventionnels, réduction des pertes alimentaires, évolution de la consommation alimentaire et élargissement des usages du bois...

Les progrès qui s'avèrent possibles pour l'atténuation des émissions de GES par le stockage de carbone (dans les sols et les produits de la biomasse), et par la substitution d'usages, sont parmi les plus importants. C'est pourquoi, au-delà de l'amélioration des pratiques agricoles et d'élevage, deux actions importantes vont devoir s'imposer au plan mondial, et en particulier dans les pays en développement : la restauration des terres, des pâturages dégradés et des sols organiques cultivés d'une part, ainsi que, d'autre part, la réduction de la déforestation, la généralisation de bonnes pratiques de gestion forestière et le reboisement.

La France : bilan carbone de l'agriculture et de la forêt

En France, les émissions annuelles de GES du compartiment « agriculture » représentent 18 % des émissions totales du pays, soit 89,7 $MtCO_2eq/an$[4], et ce principalement sous forme de CH_4 (lié surtout à l'élevage) et de N_2O (lié surtout à la fertilisation azotée). Ce chiffre est en baisse depuis 1990 du fait de la double réduction du cheptel et de la fertilisation azotée. En ajoutant les émissions liées à la consommation d'énergie fossile (tracteurs, serres…), le total agricole monte à 20 % (101 $MtCO_2eq/an$).

Mais si l'on adjoint à ce bilan l'effet bénéfique du stockage de carbone dans les forêts et les prairies, et si l'on compte, à l'inverse, le relargage de carbone dû aux mises en cultures (retournement de prairies…) ou à l'artificialisation des terres agricoles, il se trouve que le secteur des terres élargi ne représente plus alors qu'une émission « nette » de GES réduite de moitié, à 46,4 $MtCO_2eq/an$, soit 10 % du total national des émissions de GES.

Un bilan carbone global difficile à reconstituer et peu lisible

En analysant ces chiffres plus en détail, on constate que l'agriculture, outre les émissions directes citées précédemment, émet des GES parce qu'elle déstocke beaucoup de carbone dans le retournement des prairies (25,6 $MtCO_2/an$), et ceci plus qu'elle n'en absorbe et n'en stocke en tant que puits (11,8 $MtCO_2/an$). On mesure donc l'importance majeure du maintien des prairies et de l'élevage à l'herbe. A l'inverse, l'agriculture procure des bioproduits (dont les biocarburants et la chimie du végétal) permettant d'éviter par substitution l'émission de 6 à 8 $MtCO_2eq/an$.

La forêt, par homologie, stocke du carbone dans les arbres et dans les produits du bois à l'aval (74 $MtCO_2/an$). Simultanément elle contribue à substituer des matériaux, des molécules ou des énergies aux produits fossiles (55 $MtCO_2/an$)[5]. Le rôle majeur du stockage et de la substitution d'usages tout au long de la filière bois est donc remarquable, au delà même de l'importance du stock transitoire initial de carbone en forêt. Et ce rôle climatique de la filière forêt-bois est d'autant plus important que la cascade d'usages successifs de ses produits sera la plus longue possible, recyclage compris, avec si possible une valorisation énergétique durable en fin de vie.

De la comptabilisation des GES au pilotage des politiques

Cependant, le système actuel d'inventaire des GES (source CITEPA) comptabilise encore de façon compartimentée les émissions de GES de l'agriculture, le stockage de carbone et, sans l'identifier, la substitution des usages. Ceci ne permet pas d'exprimer clairement tous les potentiels climatiques des filières de l'agriculture et de la forêt qui viennent d'être examinés. Par ailleurs, cette comptabilisation prend encore peu en compte la diversité des pratiques agronomiques.

En effet, par exemple :

- le N_2O, est encore calculé trop forfaitairement, pour tous les sols et toutes les cultures ;
- les émissions agricoles de CH_4 sont calculées à partir d'un ratio par animal, qui prend peu en compte l'effet des adaptations et des variations du régime alimentaire des ruminants mis en place par les éleveurs ;
- les variations des stocks de carbone dans les sols ne sont prises en compte qu'au seul titre de leur changement d'usage (retournement des prairies, artificialisation) sans valoriser les effets de l'évolution éventuelle des pratiques culturales (par exemple : sans labour).

Les modalités d'inventaire évoluent peu à peu et s'affinent, mais on perçoit qu'il existe un enjeu réel autour de la modernisation du système de comptabilisation des GES, d'abord pour exprimer plus clairement les potentiels climatiques de l'agriculture et de la forêt (émissions/absorption/stockage/substitution), et pour pouvoir ensuite valoriser et encourager des pratiques agronomiques plus vertueuses.

[4] $MtCo_2/an$: million de tonnes de CO_2

[5] Chiffres CITEPA pour le stockage, CGAAER pour la substitution

Contrairement au passé, où l'axe énergétique fut toujours dominant dans la démarche « Kyoto », la comptabilisation des GES et l'enjeu de leur réduction devrait désormais devenir une véritable démarche « intégrante et systémique », adaptée aux spécificités des activités d'origine photosynthétique du secteur des terres. Si les modalités d'inventaire ne sont pas construites au niveau international pour donner une vision globale mais pour comptabiliser les émissions des pays sans double compte, il est indispensable de disposer d'un pilotage global des contributions climatiques de l'ensemble « agriculture, forêt et sols » et d'un système de rapportage spécifique, pour pouvoir définir des programmes d'action cohérents.

Potentiels d'atténuation et leviers d'action

Dans ce cadre d'analyse élargi (secteur des terres), il importe de bien situer les principaux potentiels d'atténuation des émissions de GES et les leviers d'action possibles en France contre le changement climatique. Il faut souligner que la plupart des actions, ici préconisées, procurent des co-bénéfices environnementaux (biodiversité, bon fonctionnement du sol, filtration de l'eau…), économiques et sociaux en termes d'emplois verts.

Les changements de pratique et de systèmes de culture

Une étude de l'INRA a sélectionné 26 actions techniques qui seraient « climatiquement » les plus efficaces et qui pourraient notamment répondre pour l'essentiel aux principes de l'agroécologie.

Elles concernent :

- la réduction des émissions de méthane issues des élevages, notamment par la promotion de la méthanisation,
- le stockage additionnel de carbone, notamment par le semis direct et les différentes formes d'agroforesterie,
- la maîtrise de la fertilisation, le recours préférentiel à l'azote organique et le développement des légumineuses.

La mise en œuvre des mesures ainsi préconisées, sans discernement, pourrait cependant accentuer fortement les risques pour les agriculteurs. Le potentiel de réduction des émissions, considéré comme effectivement atteignable à l'horizon 2030, serait de l'ordre de **12 à 15 $MtCO_2eq$/an**.

L'augmentation du rôle de la forêt

En optimisant la substitution d'usages en aval par les bioproduits et le bois énergie, et grâce à la dynamisation de la récolte forestière, au raccourcissement des cycles forestiers et au reboisement accru (dont résineux), la filière bois pourrait représenter un gain potentiel d'émissions d'environ **25 à 30 $MtCO_2$/an** en substitution[6] à l'horizon 2030 et de 3 à 5 $MtCO_2$/an en stockage. A l'inverse, on sait que la prolongation des tendances forestières actuelles se traduirait à terme par une réduction du puits de carbone forestier, et donc par une augmentation nette des émissions...

La stimulation de la sylviculture, du reboisement et de la récolte forestière, avec une dynamique accrue de valorisation des produits et sous-produits de la

[6] en incluant les bioproduits d'origine agricole (environ 4 $MtCO_2$/an)

filière (notamment dans la construction) apparaissent donc comme des leviers climatiques puissants.

Ce potentiel d'atténuation, que l'on évalue à un niveau plus important que celui des réductions directes de GES dans le secteur agricole, demande néanmoins à être précisé. Il justifie une politique forestière plus volontariste d'exploitation et de reboisement, appuyée par :

- des financements ambitieux du « fonds stratégique forestier » (carbone, fonds chaleur, finance..) potentiellement alimentés notamment par le retour du fonds issu des quotas carbone mis aux enchères ; ils pourraient en outre conforter durablement la compétitivité de notre filière bois et sa capacité d'action climatique ;
- la mise en place d'une gestion groupée et dynamique de la forêt privée la mieux structurée, la plus productive ;
- le développement de la substitution d'usages, à l'aval, grâce aux filières de la bioéconomie forestière et agricole (par exemple : biomatériaux, chimie du végétal, bioénergies et biocarburants), qui sont en forte croissance et porteuses d'innovation.

La réduction du déstockage lié à la perte de prairies et à l'artificialisation des sols

Une diminution rapide et au moins de 50 % à terme du rythme annuel de retournement des prairies et d'artificialisation des terres permettrait un gain de l'ordre de **8 à 10 $MtCO_2eq$/an** en 2030. La réduction de l'étalement urbain permettrait en outre des gains additionnels d'émissions importants dans d'autres secteurs (transport…).

La réduction du gaspillage alimentaire

Ce gaspillage, tant au stade de la production qu'à celui de la consommation, touche environ 30 % de notre production agroalimentaire. Il constitue un levier complémentaire de maîtrise des GES par l'économie des émissions sur toute la chaîne alimentaire. On évalue les économies possibles d'ici 2030 de **8 à 10 $MtCO_2eq$/an** pour une réduction de 20 % du gaspillage.

Des politiques publiques agricoles et forestières confortées

Elles pourraient être encore amplifiées et articulées avec d'autres lois ou d'autres mesures (transition énergétique, transport, logement...). Ces synergies souhaitables sont nombreuses au sein même du domaine de compétence du Ministre chargé de l'agriculture :

- **l'agroécologie**, avec la loi d'avenir, le 2ème pilier de la PAC, les outils du développement agricole (CASDAR[7]) et la nécessité d'accompagner la transition vers ces nouvelles méthodes de production ;
- **la réduction des pertes de terres agricoles et de prairies**, avec la loi d'avenir, et l'évolution de la PAC en faveur de l'élevage (avec un point de vigilance concernant les prairies) ;
- **la politique forestière**, avec la loi d'avenir (GIEEF[8]), le fonds stratégique bois, et un système d'assurances pour le risque climatique et le reboisement. Dans le même temps, le « Contrat de filière » issu de la négociation entre l'État et les professions au sein du CSF[9], devrait promouvoir la valorisation du bois à l'aval ;
- **le soutien à la bioéconomie** avec les financements de la recherche et de l'innovation, les différents plans de filière concernés, le paquet

[7] CASDAR : Compte d'affectation spéciale pour le développement agricole et rural
[8] GIEEF : Groupement d'intérêt économique et environnemental forestier
[9] CSF : Comité stratégique de filière bois

énergie climat en renégociation pour 2030, ou les plans précédents : biocarburants ; biocombustibles ; chimie du végétal et biomatériaux ;

- **la lutte contre le gaspillage** enfin, qui fait l'objet d'un plan national dédié, s'inscrit aussi bien dans des objectifs d'atténuation du changement climatique que dans la garantie de la sécurité alimentaire.

Si l'on considère que le secteur des terres en France représente aujourd'hui 46,4 $MtCO_2eq$/an en émission, les gains potentiels de l'agriculture et de la forêt (réductions d'émissions et stockage) pourraient permettre de réduire de moitié l'impact de ce secteur sur le changement climatique. En outre, la substitution de produits et d'énergie fossiles par des bioproduits chiffrée aujourd'hui à 63 $MtCO_2eq$/an, pourrait augmenter de 50 % à l'échéance 2030.Ceci ne se ferait bien entendu qu'au prix de politiques volontaristes.

La montée des risques climatiques et la nécessité de nouvelles stratégies filières/territoires conjuguant adaptation, atténuation, gestion des terres et gestion de l'eau

L'agriculture et la forêt, leurs filières et leurs capacités à produire des services climatiques d'atténuation peuvent être fortement menacées par les évolutions en cours (réchauffement climatique ou l'étalement urbain). Les trois risques climatiques identifiés par le GIEC pour l'Europe sont les inondations (liées à des problèmes de « mal-urbanisation »), les canicules (en lien avec les questions de santé et de productivité) et la relation entre l'agriculture et l'eau. Ces risques nous alertent sur la nécessité d'anticiper et d'investir pour satisfaire les nouveaux besoins en eau et pour prévenir les conflits d'usages des ressources.

La France a la chance de disposer d'une ressource en eau abondante, encore relativement peu stockée et peu mobilisée. Le développement du stockage de l'eau et de l'irrigation, pour réduire les risques, va donc devenir une impérieuse nécessité qui nous imposera une évolution des visions actuellement dominantes (et souvent réticentes). L'agroécologie (agriculture de conservation, diversification…), comme la sélection variétale, font également partie du panier de mesures d'adaptation face au climat. Dans de nombreux cas, les mesures d'adaptation et d'atténuation pourront de ce fait converger et permettre des co-bénéfices.

La forêt sera également très touchée par le changement climatique et elle devra elle-même s'adapter. Ceci passera notamment par une gestion plus dynamique, un raccourcissement des cycles de production, par la diversification des essences et des modes de sylviculture.

Relever le défi conjoint de l'adaptation et de l'atténuation face au climat, comme celui de la gestion des terres et de l'eau, nécessitera enfin plus globalement la prise en compte de la diversité des situations et des enjeux, y compris ceux de l'emploi et de la sécurité alimentaire, aux différentes échelles des territoires.

Les aspects internationaux : penser et agir ensemble, climat et sécurité alimentaire, adaptation et atténuation, Nord et Sud

Le réchauffement climatique met en péril la sécurité alimentaire et sanitaire, comme il hypothèque notamment l'avenir de l'Afrique et de la région méditerranéenne. Avec les changements dans la pluviométrie, la baisse relative des rendements et la montée des risques agricoles, on doit en effet s'attendre à des impacts lourds sur les prix alimentaires mondiaux, la pauvreté, la croissance économique et la multiplication de « trappes à pauvreté » dans les zones vulnérables. Mais il en résultera aussi des migrations subies, des conflits et des risques pour l'intégrité de certains Etats. Avec + 4°C de réchauffement, ce serait toute la sécurité alimentaire mondiale qui serait mise en péril.

Le défi climatique doit donc être conjugué à celui de la sécurité alimentaire, et, face à ce double défi, le monde se doit de bien comprendre les interconnections existantes ou possibles entre pays en termes de solutions. La mise en place de politiques agricoles et rurales appropriées (agriculture durable, soutien à l'agriculture familiale…) est donc d'une importance décisive.

Il conviendrait par conséquent de dépasser les approches strictes de négociation « climat » qui se sont jusqu'à présent caractérisées par une sorte de confrontation peu mobilisatrice entre Nord et Sud, comme entre atténuation et adaptation. A cet égard, le concept de « *Climate Smart Agriculture* » (agriculture intelligente face au climat) qui vise à conjuguer adaptation, atténuation, gestion des terres et de l'eau dans un objectif de sécurité alimentaire est des plus pertinents.

Ceci suppose l'émergence de nouveaux regards sur les complémentarités Nord/Sud, pour laquelle la France peut contribuer dans les domaines de l'agriculture et de la forêt.

Les idées fortes, à portée politique, méritent d'être mises en avant par la France

- **Les analyses climatiques des GES sont à mettre systématiquement en perspective et en synergie** avec les enjeux économiques, environnementaux et sociaux des filières et des territoires, en raisonnant ensemble atténuation et adaptation.

- **La comptabilisation normalisée des « GES » de l'agriculture et de la forêt,** du fait de leur particularité photosynthétique complexe, doit être adaptée pour éviter des incohérences. Elle doit être complétée par un pilotage global des contributions de l'ensemble du secteur des terres « agriculture, forêt et sols » à l'atténuation du changement climatique. Les objectifs de progrès n'ont de sens que dans cette vision élargie.

- **L'agriculture** française peut progresser pour être moins émissive en GES. Les choix « agroécologiques » sont à ce titre justifiés et se trouvent confortés. Une attention particulière doit être portée à la gestion de l'azote, aux bio-déchets et à la méthanisation, au semis direct et à l'agroforesterie. L'effet important du stockage de carbone dans les prairies conforte aussi la nécessité d'un élevage à l'herbe performant dont l'avantage climatique par rapport à l'élevage au grain (maïs, soja) est à souligner.

- **Le changement d'usage des terres, le retournement des prairies et l'artificialisation des terres** liée à l'urbanisme, pèsent lourd dans le déstockage de carbone. Leur indispensable réduction justifie des mesures fortes, immédiates et à effet sur le long terme.

- **La forêt** (comme l'agriculture à moindre mesure) peut accroître le stockage de carbone et fournir à l'aval des produits de substitution aux matières fossiles moyennant une politique forestière dynamique de gestion, de reboisement et de mobilisation des bois, dans des conditions écologiques compatibles.

- **Le double défi de la sécurité alimentaire mondiale et du climat** impose de produire efficacement, plus et mieux, en agriculture comme en sylviculture. La réduction de la production agricole et alimentaire européenne serait une absurdité. Elle conduirait en effet à une externalisation hors Union européenne d'une partie de la production alimentaire entrainant un accroissement probable des émissions de GES et des problèmes d'insécurité alimentaire mondiale. L'objectif clé, en agriculture, devrait donc être bien davantage celui de l'efficience (plus de production et de stockage rapportés aux émissions de GES).

- **La gestion de l'eau**, qui devient cruciale, nécessitera une nouvelle approche simultanée de l'offre (stockage, transfert…) et de la demande (efficience de l'irrigation, adaptation des systèmes

de production). Ceci nécessitera une mise à jour importante de notre vision stratégique vis à vis de l'irrigation et de notre politique de l'eau.

- **La réduction des gaspillages** et des pertes, tout au long de la chaîne alimentaire, est un autre facteur considérable (et mondial) d'atténuation des gaz à effets de serre.

- **Les territoires** doivent se préparer à d'autres lendemains où il faudra conjuguer adaptation et atténuation, gestion des terres et gestion de l'eau. Des plans agricoles et/ou forestiers visant les axes stratégiques précédents dans les territoires/filières, appuyés sur les capacités d'ingénierie nécessaires pour les élaborer aux échelles géographiques appropriées, sont nécessaires.

- **Le volet international**. Un changement de discours reconnaissant l'importance stratégique de l'agriculture, de la forêt et de la sécurité alimentaire est partout indispensable pour mettre en œuvre des politiques d'adaptation, de développement agricole et rural et d'atténuation, à la hauteur des défis. La France, avec notamment ses partenaires du Sud, peut contribuer à favoriser le dialogue pour explorer de telles solutions d'intérêt commun.

Pour en savoir plus :
Les contributions possibles de l'agriculture et de la forêt à la lutte contre le changement climatique. Rapport du CGAAER n°14056, version de février 2015 ;
consultable à l'adresse suivante :
http://agriculture.gouv.fr/rapports

Crédit photos :
page 1 : http://www.paris.fr/en/en-new/p8651; page 2 : graphique composé par Anick Leblanc Cuvillier, CGAAER ; page 3 : http://i.imgur.com/WGIavVO ; page 4 : lh6.ggpht (en haut), debroussaillement-foret.ardeche.agriculture.gouv.fr (en bas) ; page 5 : moprairie (à gauche), campusresponsables (à droite) ; page 6 : eau-debat (à gauche), eufic (à droite) ; page 7 : consoglobe (en haut), hubrural (en bas) ; page 8 : globalfoodsecurityforum

Sécurité alimentaire et changement climatique
en Méditerranée et Afrique de l'Ouest
Quel agenda d'action pour la COP 21 ?

Dans le cadre de la préparation de la COP 21, la 3ème édition du « *Séminaire Eau et Sécurité Alimentaire en Méditerranée* », *SESAME*, s'est tenu le lundi 23 février 2015 à Paris sur le thème du changement climatique.

SESAME 3 a réuni plus de 200 experts et acteurs de haut niveau d'une quinzaine de pays, dont le ministre français chargé de l'agriculture. « Plate-forme de réflexion partagée Nord/Sud et laboratoire d'idées sur la question croisée de la sécurité alimentaire, de la gestion des ressources naturelles et du développement durable des territoires, le *SESAME 3*, comme les deux précédentes éditions, a bien rempli sa fonction d'espace de dialogue et de débats » (*B. Hervieu, vice-président du CGAAER).* Il a alerté sur la montée des risques d'instabilités, mis en exergue des solutions et dessiné les grandes lignes des nécessaires stratégies alternatives.

Trois sous-régions représentatives de la problématique mondiale

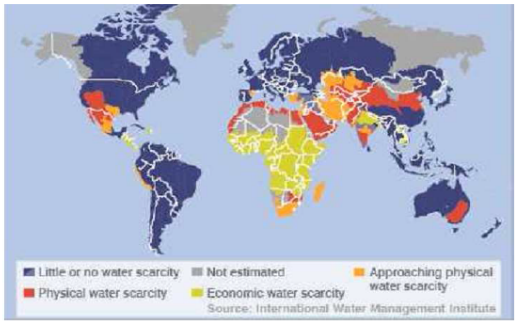
Comme la 2ème édition tenue à Meknès en 2014, *SESAME 3* a porté sur les trois sous-régions : Méditerranée du Nord (Europe), Méditerranée du Sud et de l'Est et Afrique de l'Ouest. Celles-ci, par leurs différences de situations en termes de croissance démographique, de niveaux de développement, d'emplois agricoles (la proportion d'agriculteurs dans le total d'actifs va de moins de 3 % en France, à plus de 70 % au Mali) et d'eau, sont bien représentatives de la diversité mondiale.

L'eau : abondance, rareté, sur ou sous-exploitation

Le changement climatique menace la sécurité alimentaire d'abord par ses impacts sur l'eau. Il est donc important de souligner les points communs aux trois sous-régions (la forte irrégularité spatiale et temporelle des pluies, le poids de l'irrigation en termes de production et d'emplois, la place prépondérante en surface de l'agriculture pluviale et des espaces agro-sylvo-pastoraux sauf pour l'Égypte et la Libye) mais aussi les différences de situations. Ces dernières sont en effet importantes car :

- **Le Sud de la Méditerranée**, du Maroc à la Syrie, est en situation de **rareté physique**. Les pays ne reçoivent que 10 % du total méditerranéen des pluies et la demande en eau actuelle (utilisations et pertes) équivaut à 116 % des ressources conventionnelles potentielles. La part d'eau « non durable » utilisée, c'est-à-dire prélevée dans les nappes fossiles ou par surexploitation des nappes renouvelables, représente environ 30 % du total mobilisé au Maghreb et 40 % en Syrie.

Rareté et abondance de la ressource en eau
(d'après IMWI 2007)



déficit physique (plus de 70 % prélevés)
déficit économique
ressources abondantes (moins de 25 % prélevés)

- **Le Nord de la Méditerranée,** du Portugal à la Turquie, dispose de **ressources abondantes**. Les pays reçoivent 90 % du total méditerranéen. La demande en eau ne représente que 13 % des ressources conventionnelles. Utilisée en grande partie pour la production d'énergie, elle est en outre peu « consommée » (évapo-transpirée). En France, seulement 3 % de la ressource est « consommée » : 5,4 km^3/175 km^3.

- **L'Afrique de l'Ouest** est en situation de **rareté économique**. Bien que très inégalement réparties, les ressources en eau sont abondantes. Cependant, faute de capacités institutionnelles et de financements suffisants, seule une petite partie du potentiel irrigable a été réalisé.

Note de synthèse établie par Guillaume Benoit, ingénieur général des ponts, des eaux et des forêts, membre permanent du CGAAER (France), membre du panel international d'experts du Conseil général du développement agricole (Maroc), ex directeur du Plan Bleu pour la Méditerranée

Des sols gaspillés ou dégradés

Les sols sont l'autre ressource base de la production agricole. Or, les trois sous-régions, comme le reste du monde, ont en commun d'être confrontées à d'importants **problèmes de « non durabilités »**.

En Afrique de l'Ouest, en Méditerranée du Sud et dans de nombreux espaces agro-sylvo-pastoraux méditerranéens de l'Union européenne, de nombreuses terres et parcours sont aujourd'hui fortement dégradés.

Dans un grand nombre de pays, notamment du **Sud**, les problèmes d'érosion, de salinisation et de désertification, d'envasement rapide des retenues des barrages, sont particulièrement graves. Au Sud de la Méditerranée, c'est aussi la faiblesse des rendements et la pauvreté rurale dans les montagnes et dans les zones semi-arides non irriguées, dont beaucoup sont très peuplées, qui sont une grande cause de vulnérabilité. Avec l'aridification croissante, des migrations et des déstockages de carbone importants sont possibles.

En **Europe**, ce sont surtout les problèmes de déprise, d'étalement urbain et donc de « désagricolisation » qui sont à souligner ; en seulement cinquante ans, 13 millions ha de SAU et 10 millions ha d'herbe ont en effet été perdus dans les pays allant duPortugal à la Turquie !

Abandon et invasion d'arbustes…

Feu destructeur !

Photos D Crespo

Une dépendance alimentaire croissante au Sud Que fera l'Europe ?

Ainsi peut-on dire que les trois sous-régions gaspillent, dégradent et sous-valorisent leurs ressources rurales alors que les besoins alimentaires sont pourtant en forte croissance, que des emplois doivent être créés en grand nombre (300 millions en Afrique !), et que le **problème de la sécurisation des approvisionnements** des pays importateurs se pose de façon de plus en plus cruciale.

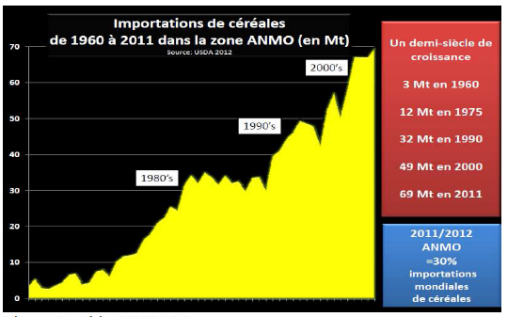


Figure S. Abis CIHEAM

Les importations de céréales de la **région MENA/ANMO** (Afrique du Nord, Moyen-Orient) sont en effet passées de 3 millions de tonnes en 1960 à 69 millions de tonnes en 2011, et elles pourraient encore plus que doubler d'ici 2050 (*Agrimonde 2050*). **L'Afrique de l'Ouest**, qui a peu développé son agriculture, est aussi très importatrice.

Le sud méditerranéen et l'Afrique en sont d'autant plus vulnérables : la crise de 2007-2008 a conduit à des émeutes dites « de la faim » dans de nombreux pays.

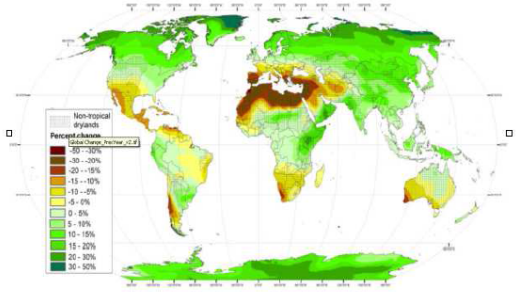
Comme l'Asie du Sud devient, elle aussi, une grande région importatrice d'aliments, faute de terres et d'eau suffisantes, les régions plus favorisées en ressources seront bien davantage mises à contributions. **L'Europe**, et notamment la France, qui exporte 33 millions de tonnes de céréales/an (2ème pays exportateur mondial) grâce à l'excellence de son climat, de ses sols et de son agriculture, fait partie de ces régions privilégiées. Mais quelle sera sa position ? Externalisera-t-elle une partie de sa production avec des risques presque certains de générer in fine un bilan climatique aggravé (impact indirect sur la déforestation) ou profitera-t-elle de ses ressources en eau pour s'adapter, maintenir sa production et mettre à profit cette demande croissante du marché mondial ?

Le climat et l'alimentation : un grand sujet de géopolitique

Dans les pays du Sud, le dérèglement du climat est d'abord un problème pour l'agriculture et pour la sécurité alimentaire. En Afrique et dans le Sud méditerranéen, la variabilité climatique, dans ses évolutions récentes, est en effet déjà vécue comme une véritable malédiction. Même de petits incréments de risques, sous la forme de pluies retardées ou diluviennes, de sécheresses prolongées ou de températures plus élevées, sont devenus une source majeure de pauvreté et d'insécurité pour les ruraux vulnérables.

Les baisses de précipitations et d'écoulements et les hausses de température déjà constatées et annoncées font de la région un site critique mondial. Les rendements vont relativement baisser et les besoins en eau de l'agriculture s'accroître.

Baisse des précipitations moyennes 2080-99/1980-99
d'après ICARDA (source Christensen 2007)



Le problème est aussi européen et mondial. « La stagnation observée des rendements du blé en France depuis les années 1990 est due au facteur climatique dans une proportion de 30 à 70 %. Au niveau mondial, la perte relative de rendements pour le blé est de 2 % par décennie » (*J-F. Soussana, directeur à l'INRA, membre du GIEC*).

« Ce qui est encore certain, c'est qu'on aura beaucoup plus de variabilité dans les précipitations : l'eau ne tombera pas quand on veut ni là où l'on veut : il nous faut donc faire quelque chose. » (*M. Couchoud, présidente de l'IME*).

Les menaces pesant sur les systèmes agricoles et alimentaires, notamment en zones semi-arides, sont graves et il faut en prendre conscience.

- « Le changement climatique affecte en premier lieu la base productive de l'agriculture en raison de la dégradation de ses ressources en terre et en eau, en raison des péjorations que le changement climatique entraînera sur les écosystèmes et en raison aussi des faiblesses internes des agricultures du Sud. Une prise de conscience collective des vulnérabilités de nos systèmes agricoles constitue donc le point de départ d'une démarche politique » (*M. Aït Kadi, président du Conseil général du développement agricole du Maroc*).

- « Ce qui est sûr, c'est que la science se retrouve face à une situation totalement inconnue et qu'on va avoir des crises à gérer : migrations, changements d'usages des terres, conflits et guerres, surtout au Sahel. Il nous faut réussir à renforcer la résilience des systèmes par des processus innovants de développement territorial » (*P. Caron, directeur du CIRAD*).

- « La Méditerranée concentre la problématique des ressources naturelles. Les questions agricoles et alimentaires sont les déclencheurs des révolutions du monde arabe comme elles l'ont été autrefois pour les révolutions européennes. Ce n'est pas seulement une question de climat et d'alimentation : c'est une grande question politique, un grand sujet de géopolitique. On doit donc travailler ensemble sur ces sujets » (*S. Le Foll, ministre de l'agriculture, de l'agro-alimentaire et de la forêt*).

Des solutions climato-intelligentes pour relever le défi alimentaire et climatique

L'importance clef du « secteur des terres »

Assurer la sécurité alimentaire à l'ère du changement climatique, c'est **anticiper** et c'est **réussir à la fois l'adaptation, l'atténuation, et le développement**. Le « secteur des terres », c'est-à-dire l'agriculture et l'alimentation, les sols, les forêts, ainsi que les biofilières, est placé au centre de ce défi mondial car :

- Il représente « de 20 à 60 % du potentiel d'atténuation à l'horizon 2030 » (*GIEC 2014*),
- L'agriculture est un secteur crucial pour réduire la pauvreté et réussir le développement (*Banque mondiale, rapport spécial 2008*),
- Son progrès conditionne la satisfaction du droit universel à l'alimentation,
- L'agriculture et la forêt sont très menacées et doivent réussir à s'adapter sinon il n'y aura ni réussite de l'atténuation, ni sécurité alimentaire.

Des marges de progrès possibles importantes

Le rapport *« Les contributions possibles de l'agriculture et de la forêt à la lutte contre le changement climatique »* (CGAAER, février 2015), montre qu'en conjuguant transition agro-écologique (meilleure gestion de l'azote, recours accru aux légumineuses, agro-foresterie, zéro labour, méthanisation…), réduction des pertes (en terres agricoles, en prairies) et des gaspillages alimentaires, et gestion dynamique de la forêt et des biofilières, c'est plus du quart de l'objectif national d'atténuation fixé par la France pour 2030 qui pourra être obtenu.

En plus des réductions directes et indirectes d'émissions, on peut en effet améliorer les mécanismes naturels faisant des productions des champs et des bois de véritables **pompes à carbone**, capables de le **stocker** puis de **substituer** des produits biosourcés à des énergies et à des matériaux beaucoup plus émissifs de gaz à effet de serre.

La restauration des terres dégradées : une priorité de premier rang

La restauration des terres dégradées est une condition d'une transition mondiale réussie. Elle représente en effet une priorité de premier rang pour la réussite de l'atténuation (*GIEC, 2014*) et peut permettre des bénéfices considérables en termes de production et d'adaptation.

L'Afrique de l'Ouest et la Méditerranée sont particulièrement concernées. Des exemples de réussites confirment la possibilité de progrès décisifs multiples :

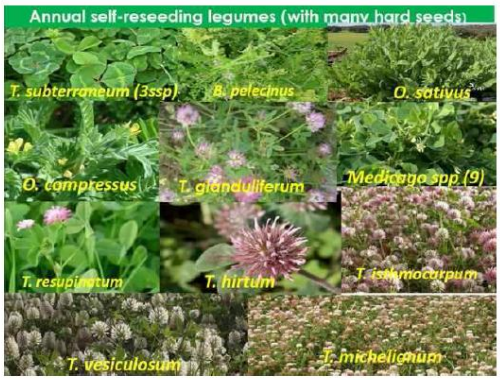
- **Au Maroc,** l'agriculture de conservation en blé pluvial (semis direct) permet en moyenne une séquestration de carbone de 1 à 4 tonne CO_2/ha, de réduire la consommation d'énergie de 70 % et d'accroître les rendements de 30 à 40 % et la productivité de l'eau de 60 % (*M. Badraoui, DG INRA Maroc*). Cependant, seulement 10 000 ha sont aujourd'hui concernés.

- **En Afrique de l'Ouest**, où les sols sont très dégradés, les techniques de conservation des eaux et des sols, de gestion durable des terres et de régénération naturelle assistée ont fait leur preuve. « En 2007, sur le plateau central du Burkina, les rendements observés ont été accrus de 39 % avec la technique des cordons seuls, et de 112 % et 118 % avec la technique des demi-lunes et des cordons avec zaï » (*S. Atta, CILSS*). Les paysans du Niger ont démontré cette dernière décennie que le Sahel peut reverdir.

Techniques de cordons avec zaï
(trous avec matière organique) - Source : S. Atta

- **En Europe méditerranéenne,** de nombreux sols sont aussi usés, acides, très pauvres en matière organique et en phosphore. Très peu productifs, ils n'autorisent au Portugal qu'un taux de chargement de 0,1 à 0,5 UGB/ha avec pour conséquences un très faible retour économique, voire la déprise et donc la spirale de la friche et du feu. Cependant, en semant une grande variété de légumineuses inoculées en rhizobium et en apportant du phosphore, « près de 500 000 ha de terres dégradées ont été réhabilités depuis plus de 30 ans : la productivité et la séquestration du carbone ont été plus que doublées » (*D. Crespo, président de Fertiprado).*

Les légumineuses méditerranéennes : une biodiversité d'importance stratégique (photo : D Crespo)



La rétention de l'eau et la vie biologique des sols

La conservation des eaux et des sols, la collecte de l'eau de ruissellement (« **water harvesting** »), la rétention en eau dans les sols sont donc de grande importance. Elles permettent en effet de réduire la quantité d'eau perdue (évaporée) au profit de l'eau transpirée, donc d'accroître la production, d'infiltrer l'eau et de contribuer ainsi à « produire » de l'eau pour l'aval et à réduire l'érosion et les risques d'inondations.

Il nous faut surtout **prendre soin des sols et mieux valoriser l'énergie solaire, la photosynthèse.** « Eviter de mettre des sols à nu, mettre des plantes de couverture, des inter-cultures systématiques avec des légumineuses ; tout cela permet un stockage de carbone et d'azote et on utilisera moins d'intrants : donc plus de matière organique, plus de production et moins de charges (*C. Rousseau, président agriculture et innovation de Vivescia*).

Water harvesting (Photo ICARDA)

Le stockage et la mobilisation des ressources en eau

La **meilleure mobilisation des ressources en eau et le stockage de l'eau** sont tout aussi importants.

- **En Afrique de l'Ouest**, le faible taux d'irrigation rend la région très vulnérable au changement climatique alors que « le potentiel de mise en valeur agricole des terres est encore immense et que le secteur est susceptible de faire progresser de façon très sensible le taux de croissance du pays, de rééquilibrer la balance commerciale, de créer de très nombreux nouveaux emplois directs et indirects, de fixer les jeunes dans les zones rurales et de désengorger ainsi les zones urbaines » *(M. Ndao, directeur vallée du fleuve Sénégal).* « L'adoption de variétés à haut rendement, économes en eau et à cycles courts a permis des rendements en riz allant jusqu'à 8 t/ha parmi les plus élevés du monde, ce qui fixe les jeunes qui autrement partiraient pour la ville ou pour l'Europe » (*N. Diop, agriculteur et responsable professionnel sénégalais*).

- **En Algérie**, « la première réponse au défi climatique est de mieux mobiliser la ressource : poursuite de la politique de barrages, transferts à longue distance, traitement et réutilisations des eaux usées (800 millions m^3 mobilisés), usines de désalinisation pour les villes côtières ce qui évite de prendre trop d'eau à l'agriculture » (*F. Chehat, DG INRA Algérie*).

- **L'Europe du Sud** connaîtra aussi, avec le changement climatique, de fortes irrégularités de pluviométrie, un accroissement des besoins en eau des plantes en pluvial et en irrigué et une baisse sensible des écoulements annuels.

« La question du comment sécuriser les productions se posera dans la plupart des territoires. L'Espagne montre la possibilité d'une politique publique qui, en conjuguant action sur l'offre (stockage des excédents hivernaux pour une utilisation au printemps) et sur la demande (efficience), se donne l'ambition de réussir une triple durabilité : écologique, agro-alimentaire et énergétique. En France, selon l'étude *Garonne 2050*, et quel que soit le scénario qui s'imposera, il faudra stocker l'hiver pour répondre aux besoins de l'étiage. Cependant, nous n'avons pas encore pris la mesure de l'impact du dérèglement climatique ainsi que les changements nécessaires de politiques. Il nous faut donc apprendre à regarder vers le Sud » (*J-Y. Grosclaude, ingénieur général, CGAAER ; ex directeur stratégie AFD*).

Raisonner « productivité de l'eau » et innover dans les zones semi-arides

Les progrès d'efficience possibles dans les zones semi-arides où l'eau fait défaut sont importants. « Il convient dans ces régions de raisonner « **productivité de l'eau** » (et non de la terre), d'innover et de réduire et taxer les sur-irrigations. L'irrigation de déficit et l'irrigation de complément améliorée peuvent permettre des gains de productivité et d'économie en eau de 30 %.

En Égypte, 37 000 ha irrigués dans la province de Sharkia sont depuis 3 ans cultivés en lits surélevés, ce qui permet d'accroître la productivité de l'eau de 72 % et les rendements de 30 % » (*M. Solh, DG ICARDA*).

Innovation dans l'irrigation en Égypte
(Source ICARDA)

Avec un accès généralisé aux bonnes pratiques et à des variétés adaptées, les gains potentiels de production de la Méditerranée du Sud et de l'Afrique de l'Ouest, en pluvial comme en irrigué, peuvent être élevés alors que le scénario tendanciel annonce au contraire une forte chute des rendements du fait du dérèglement climatique.

Quatre priorités stratégiques pour la Méditerranée et l'Afrique de l'Ouest

Le contenu des nécessaires stratégies alternatives est clairement ressorti des trois séminaires SESAME.

Il s'agit d'abord de **prendre conscience de notre vulnérabilité** et de la montée des risques puis de comprendre les enjeux et voies de solutions. Il nous faut, par suite, **réussir un autre rapport à la terre et à l'eau, redonner considération à nos ressources rurales** (humaines, naturelles et culturelles) pour les préserver, les restaurer et les valoriser. Il nous faut enfin **penser nos inter-relations en termes de solutions et innover**.

Les quatre priorités stratégiques qui sont ressorties des débats sont les suivantes.

1. Bâtir au Sud sur la vision d'un avenir intégrant le monde rural, et en particulier l'agriculture familiale, dans la modernité

Il s'agit d'améliorer et de renforcer la connexion des exploitations familiales vers les marchés locaux, nationaux ou internationaux (agriculture contractuelle, structuration professionnelle et interprofessionnelle...), d'offrir des emplois aux jeunes, de leur donner des perspectives y compris en zones rurales. L'accès à un **financement** adapté à l'agriculture, la **transformation agro-alimentaire**, la défense et la promotion de l'« **origine** » et le maintien de prix rémunérateurs doivent devenir des premières priorités car le monde rural a besoin d'investissements, de réduire les pertes post récoltes et de créer des emplois et de la richesse dans les territoires.

La transition que l'Europe a connu depuis 60 ans est à mener au Sud de façon accélérée en en tirant toutes les leçons utiles. Sans émergence de collectifs agricoles permettant l'accès aux marchés et à la responsabilité collective, sans agrégation et sans tissu industriel, on va à la catastrophe. L'enjeu est donc la mise en place de **politiques agricoles qui soient aussi de grandes politiques agro-alimentaires et de crédit à l'agriculture**. Le Plan Maroc Vert et le dispositif de méso-finance Tamwil El Fellah illustrent le type d'engagement possible (cf. rapport SESAME 2).

2. Accroître la productivité de l'eau, de la terre et passer partout à des systèmes résilients et producteurs de services environnementaux

Il s'agit de **réussir l'intensification durable de l'agriculture et la transition agro-écologique,** ce qui, outre les progrès en termes de production, de revenus et de bien être social, peut permettre de stocker du carbone, de « produire » de l'eau pour l'aval et encore bien d'autres services environnementaux.

Les voies de solutions sont claires : innovations techniques et sociales, agroécologie, agricultures de conservation et de précision, extension et efficience de l'irrigation, réduction des pertes et gaspillages (terres agricoles, aliments), restauration des terres dégradées, rétention de l'eau dans les sols et revitalisation des sols, stockage des excédents d'eau hivernaux (en surface et dans les nappes), « productivité de l'eau » et recours aux eaux non conventionnelles dans les pays semi-arides, réconciliation entre agriculture et élevage, sélection variétale.

Il s'agit aussi de reconnaître le rôle clef des **communautés rurales,** de renforcer leurs pouvoirs et d'appuyer la mise en place d'une **animation rurale** formée aux nouvelles approches participatives, de **plans de gestion agro-sylvo-pastoraux contractualisés avec les communautés, et de paiements pour services environnementaux**.

3. Anticiper et repenser l'utilisation de l'eau et des terres, passer partout à des territoires « climato-intelligents »

Il s'agit de faire de la sécurité alimentaire, locale et globale, un objectif majeur des politiques de l'eau et des politiques urbaines et de promouvoir des **solutions et plans d'action « eau et agriculture » adaptés à chaque territoire**, lesquels pourront agir à la fois sur l'offre (stockage de l'eau, transferts, réutilisations…), sur la demande (efficience, régulation…) et sur la diversification de l'économie rurale pour réussir l'adaptation, le développement, l'atténuation et la durabilité.

4. Faire de la recherche agronomique et de l'innovation un véritable choix stratégique

Source ICARDA

Quels enjeux pour la COP 21 ?

La réussite de la négociation suppose de réconcilier la sécurité alimentaire et la lutte contre le changement climatique.

La question des terres, des sols, de l'eau et des forêts est clef : si on n'en prend pas soin, on réduit la production, on déstocke du carbone. On doit penser ensemble les enjeux d'adaptation, d'atténuation et de développement et expliquer cela aux diplomates qui ne sont pas des techniciens (*L. Tubiana, rapporteur spécial pour la COP 21*).

Des cadres de coopération régionale pour la Méditerranée et l'Afrique de l'Ouest

L'espace géographique méditerranéen et ouest-africain peut être démonstratif du scénario du futur pour l'agriculture, l'eau, les sols, les forêts et les territoires. La Méditerranée avec notamment l'UpM et le CIHEAM, et l'Afrique de l'Ouest avec la CEDEAO, ont la chance de disposer de cadres de coopération régionale qui peuvent jouer un rôle important. « L'UPM peut mobiliser les 43 États membres, servir de plate-forme allant au-delà des seuls États et créer un agenda commun autour d'objectifs communs. Un mandat lui a été donné sur le climat par la conférence ministérielle d'Athènes et elle peut soutenir les États dans la mise en œuvre des résultats de la COP 21 (*T. Ribeiro, secrétaire générale adjointe de l'UPM, chargé du climat*). « Le CIHEAM témoigne du souci constant depuis des décennies de ses treize États membres de travailler ensemble sur ces questions vitales de l'agriculture et de la sécurité alimentaire en Méditerranée. Le changement climatique nous oblige à faire davantage pour réduire les incertitudes et à mieux prendre en compte la complexité » (*C. Lacirignola, secrétaire général du CIHEAM*).

Il nous faut agir en amont et en aval de la COP 21.

Mettons à profit l'*Agenda des solutions* pour proposer une action de coopération reliant recherche et développement, entreprises et gouvernements, et pour montrer que l'agriculture et les territoires peuvent contribuer à résoudre les grands problèmes du monde.

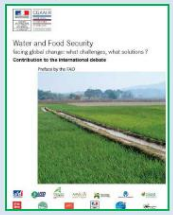
Et créons l'impulsion qui fera que chaque pays chiffrera les progrès possibles de son secteur des terres, et permettra une large mobilisation des acteurs et des financements.

Pour en savoir plus :

SESAME 1

Rapport du CGAAER

L'eau et la sécurité alimentaire



SESAME 2

SESAME 3

Rapport du CGAAER

Les contributions possibles de l'agriculture et de la forêt à la lutte contre le changement climatique

COMMENTARY:

The challenge to keep global warming below 2 °C

[Au:changes to title OK?] Glen P. Peters, Robbie M. Andrew, Tom Boden, Josep G. Canadell, Philippe Ciais, Corinne Le Quéré, Gregg Marland, Michael R. Raupach and Charlie Wilson

The latest carbon dioxide emissions continue to track the high end of a range of emission scenarios, expanding the gap between current trends and those necessary to keep climate warming **[Au:OK?]** below 2 °C. A shift to a 2 °C-pathway requires initiating large and sustained global mitigation soon, with a probable reliance on net negative emissions in the longer term.

On-going climate negotiations have recognized a "significant gap" between the current trajectory of global greenhouse-gas emissions and the "likely chance of holding the increase in global average temperature below 2 °C or 1.5 °C above pre-industrial levels"[1]. Here we compare recent trends in carbon dioxide (CO_2) emissions from fossil-fuel combustion, cement production, and gas flaring with the primary emission scenarios used by the Intergovernmental Panel on Climate Change (Fig. 1 [**Au: move of fig. citation OK?**]). Carbon dioxide emissions are the greatest contributor to [**Au: changed for clarity, OK?**] long-term climate change and thus provide a good baseline to assess progress and examine consequences. We find that current emission trends continue to track scenarios that lead to the highest temperature increases. Further delay in global mitigation makes it increasingly difficult to stay below 2 °C.

Long-term emissions scenarios are designed to represent a range of plausible emission trajectories as input for climate change research[2,3]. The Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) process has resulted in four generations of emissions scenarios[2]: Scientific Assessment 1990 (SA90), IPCC Scenarios 1992 (IS92), Special Report on Emissions Scenarios (SRES), and the evolving Representative Concentration Pathways (RCPs)[**Au: please provide references for each of these sets of scenarios**] to be used in the upcoming IPCC Fifth Assessment Report. The RCPs were developed by researchers for use by the climate modelling community, followed later by the socio-economic and emissions scenarios spanning the range of the RCPs and beyond[2] [**Au:changes to this sentence OK?**].

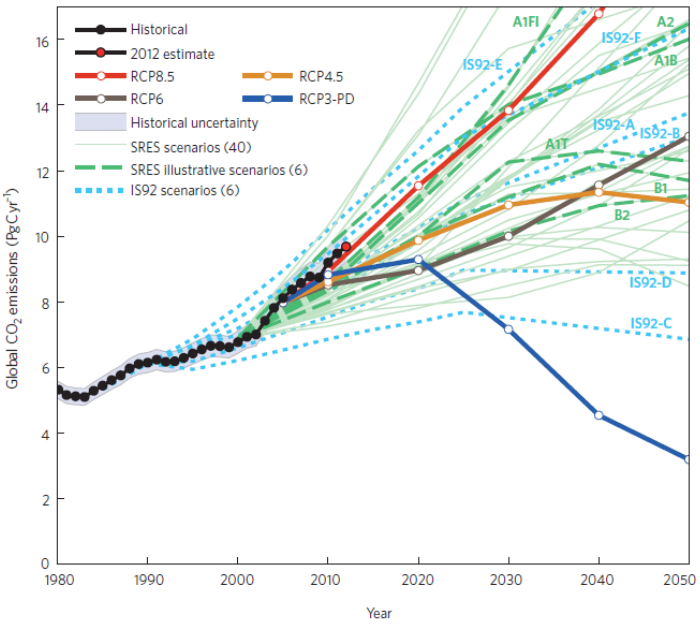


Figure 1 | Estimated CO_2 emissions over the past three decades from fossil-fuel combustion, cement production and gas flaring. Comparison of the IS92, SRES, and RCPs scenarios: the SA90 data are not shown, but the most relevant (SA90-A) is similar to IS92-A and IS92-F. The uncertainty in historical emissions is ±5% (one standard deviation). Scenario data is generally reported at decadal intervals and we use linear interpolation for intermediate years.**[Au:changes to caption OK?]**

It is important to regularly re-assess the relevance of emissions scenarios in light of changing global circumstances[3,4]. In the past, decadal trends in CO_2 emissions [**Au: OK?**] have responded slowly to changes in the underlying emission drivers because of inertia and path dependence [**Au: what does this mean?**] in technical, social, and political systems[5]. Inertia and path dependence are unlikely to be affected by short-term

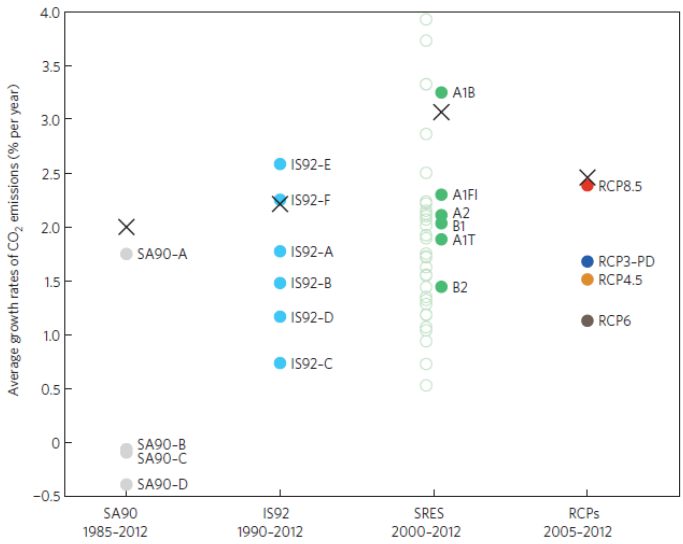


Figure 2 |[Au:please provide a short figure title] The average annual growth rates of the historical emission estimates (black crosses) and the emission scenarios for the time periods of overlaps (shown on the horizontal axis). The growth rates are more comparable for the longer time intervals considered (in order: SA90, 27 years; IS92, 22 years; SRES, 12 years; and RCPs, 7 years). For the SRES, we represent the marker scenario for each family (filled circles) and each of the contributing model scenarios (open circles).The short-term growth rates of the scenarios do not necessarily reflect the long-term emission pathway (for example, A1B has a high initial growth rate compared to its long-term behaviour and RCP3PD has a higher growth rate until 2010 compared to RCP4.5 and RCP6). The scenarios generally report emissions at intervals of 10 years or more and we interpolated linearly to 2012; a sensitivity analysis shows a linear interpolation is robust (Supplementary Information **[Au: should this refer to a specific figure/table in the SI?]**)

fluctuations[2,3,5] — such as financial crises[6] — and it is probable that emissions will continue to rise for a period even after global mitigation has started[7]. Thermal inertia and vertical mixing in the ocean, also delay the temperature response to CO_2 emissions[8]. As global circumstances, inertia and path dependence are all fluctuating **[Au:OK?]**, there is value in comparing observed decadal emission trends with emission scenarios to help inform the likelihood of different scenarios, explore the feasibility of desired changes in the current emission trajectory and identify whether new scenarios may be needed.

Global CO_2 emissions have increased by 54% since 1990, from 6.1±0.3 Pg C in 1990 to 9.5±0.5 Pg C in 2011 (3% over 2010), with average annual growth rates of 1.9% per year in the 1980s, 1.0% per year in the 1990s, and 3.1% per year since 2000 (Supplementary Information **[Au: should this refer to a specific figure/table in the SI?]**). We estimate that emissions in 2012 will be 9.7±0.5 Pg C or 2.6% above 2011 (range of 1.9–3.5%). The observed growth rates are at the top end of all four generations of emissions scenarios (Fig. 2). Of the previous illustrative IPCC scenarios, only IS92-E, IS92-F and SRES A1B exceed the observed emissions (Fig. 1) or their rates of growth (Fig. 2), with RCP8.5 lower but within uncertainty bounds of observed emissions **[Au: fig citation move above OK, or swap these two sentences around to cite figures in order?]**.

Observed emission trends are in line with SA90-A, IS92-E and IS92-F, SRES A1FI, A1B, and A2, and RCP8.5 (Fig. 2). The SRES scenarios A1FI and A2 and RCP8.5 lead to the highest temperature projections among the scenarios, with a mean temperature increase of 4.2–5.0 °C in 2100 (range of 3.5–6.2 °C)[9], whereas the SRES A1B scenario has decreasing emissions after 2050 leading to a lower temperature increase of 3.5 °C (range 2.9–4.4°C)[9]. Earlier research has noted that observed emissions have tracked the upper SRES scenarios[10,11] and Fig. 1 confirms this for all four scenario generations. This indicates that the space of possible pathways could be extended above the top-end scenarios to accommodate the possibility of even higher emission rates in the future.

The new RCPs are particularly relevant because, in contrast to the earlier scenarios, mitigation efforts consistent with long-term policy objectives are included among the pathways[2,5][**Au: correct?**]. The RCP3–PD (Peak and Decline in concentration) leads to a mean temperature increase of 1.5 °C in 2100 (range of 1.3–1.9 °C)[9]. RCP3–PD requires net negative emissions (for example, bioenergy with carbon capture and storage) from 2070, but some scenarios suggest it is possible to stay below 2 °C without negative emissions[12–14]. In the long term, RCP4.5 and RCP6 — which lie between RCP3–PD and RCP8.5— lead to a mean temperature increase of 2.4 °C (range of 1.0–3.0 °C) and 3.0 °C (range of 2.6–3.7 °C) in 2100, respectively[9] [**Au:changes to this sentence OK? to avoid starting a sentence with an abbrevation**]. For RCP4.5, RCP6 and RCP8.5, temperatures will continue to increase after 2100 due to on-going emissions[9] and inertia in the climate system[8].

Current emissions are tracking slightly above RCP8.5, and given the growing gap between the other RCPs (Fig. 1), significant emission reductions are needed by 2020 to keep 2 °C as a feasible goal[13–15]. To follow an emission trend that can keep the temperature increase below 2 °C (RCP3-PD) requires sustained global CO_2 mitigation rates of around 3% per year, if global emissions peak before 2020[7,14]. A delay in starting mitigation activities will lead to higher mitigation rates[7], higher costs[16,17], and the target of remaining below 2 °C may become infeasible[13,15]. If participation is low, then higher rates of mitigation are needed in individual countries, and this may even increase mitigation costs for all countries[17]. Many of these rates assume that negative emissions will be possible and affordable later this century[7,12,13,15]. Reliance on negative emissions has high risks because of potential delays or failure in the development and large-scale deployment of emerging technologies such as carbon capture and storage, particularly those connected to bioenergy[12,13].

Although current emissions are tracking the higher scenarios, it is still possible to transition towards pathways consistent with keeping temperatures below 2 °C (refs 12,14,15). The historical record shows that some countries have reduced CO_2 emissions over 10-year periods (Supplementary Information **[Au: should this refer to a specific figure/table in the SI?]**), through a combination of (non-climate) policy

intervention and economic adjustments to changing resource availability. The oil crisis of 1973 led to new policies on energy supply and energy savings, which produced a decrease in the share of fossil fuels (oil shifted to nuclear) in the energy supply of Belgium, France, and Sweden, with emission reductions of 4–5% per year sustained over 10 or more years(Supplementary Information [**Au: should this refer to a specific figure/table in the SI?**]). A continuous shift to natural gas — partially substituting coal and oil — led to sustained mitigation rates of 1–2% per year in the UK in the 1970's and again in the 2000's, 2% per year in Denmark in the 1990–2000's, and 1.4% per year since 2005 in the USA (Supplementary Information [**Au: should this refer to a specific figure/table in the SI?**]). These examples highlight the practical feasibility of emission reductions through fuel substitution and efficiency improvements, but additional factors such as carbon leakage[18] need to be considered. These types of emission reductions can help initiate a transition towards trajectories consistent with keeping temperatures below 2 °C, but further mitigation measures are needed to complete and sustain the reductions.

Similar energy transitions could be encouraged and co-ordinated across countries in the next 10 years using available technologies[14], but well-targeted technological innovations[19] are required to sustain the mitigation rates for longer periods[12]. To move below the RCP8.5 scenario — avoiding the worst climate impacts — requires early action[12,13,16] and organized [**Au:OK? avoiding repetition of 'co-operaton/ing**] mitigation from the largest emitters[17] such as China, the United States, the European Union and India. These four regions together account for over half of global CO_2 emissions, and have strong and centralized governing bodies capable of co-ordinating such actions. Repeating similar energy transitions over many decades in a broader range of developed and emerging economies, the current emission trend could be pulled down to make RCP3-PD, RCP4.5, and RCP6 all feasible futures.

A shift to a pathway with the highest likelihood to remain below 2 °C above pre-industrial levels (for example, RCP3-PD), requires high levels of technological, social, and political innovations, and an increasing need to rely on net negative emissions in future[7,12,13] [**Au: correct?**]. The timing of mitigation efforts needs to account for delayed responses in both CO_2 emissions[5] (because of inertia in technical, social, and political systems) and also in global temperature[8] (because of inertia in the climate system). Unless large and concerted global mitigation efforts are initiated soon, the goal of remaining below 2 °C will soon become unachievable. ❐

Glen P. Peters[1], Robbie M. Andrew[1], Tom Boden[2], Josep G. Canadell[3], Philippe Ciais[4], Corinne Le Quéré[5], Gregg Marland[6], Michael R. Raupach[3] and Charlie Wilson[5] are at the [1]Center for International Climate and Environmental Research – Oslo (CICERO), Oslo, Norway, [2]Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC), Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, USA, [3]Global Carbon Project, CSIRO Marine and Atmospheric Research, Canberra, Australia, [4]Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Gif sur Yvette, France, [5]Tyndall Centre for Climate Change Research, University of East Anglia, Norwich, UK, and [6]Research Institute for Environment, Energy, and Economics, Appalachian State University, Boone, USA.
**e-mail: glen.peters@cicero.uio.no*

Acknowledgements
This work is a collaborative effort of the Global Carbon Project, a joint project of the Earth System Science Partnership, to provide regular analyses of the main global carbon sources and sinks (http://www.globalcarbonproject.org/). G.P.P. and R.M.A were supported by the Norwegian Research Council (project 221355/E10). T.B. and the Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC) are supported by the US Department of Energy, Office of Science, Biological and Environmental Research. C.L.Q. thanks the UK Natural Environment Research Council (project NE/103002X/1) and the European Commission (project FP7-283080) for support. J.G.C. and M.R.R. thank the Australian Climate Change Science Program for support.

Author contributions
All authors contributed to the planning of the paper. G.P.P. led the work. G.M. and T.B. contributed the updated CO_2 emission data. R.M.A. prepared the figures and associated analysis. G.P.P. did the 2012 emission estimate and the analysis of the historical reduction rates. All authors contributed to data interpretation and to the writing of the paper.

Additional information
Supplementary information is available in the online version of the paper. Reprints and permissions information is available online at www.nature.com/reprints http://www.nature.com/reprints. Correspondence and requests for material should be addressed to G.P. . All data presented in this paper, including the full global CO_2 budget for 2011, can be accessed at http://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/.

References [Au: ref. 9 removed, please check all ref citations in text are correct]
1. UNFCCC *Establishment of an Ad Hoc Working Group on the Durban Platform for Enhanced Action* (UNFCCC, 2011).
2. Moss, R. H. *et al. Nature* **463,** 747–756 (2010).
3. Van Vuuren, D. *et al. Climatic Change* **103,** 635–642 (2010).
4. Richels, R. G., Tol, R. S. J. & Yohe, G. W. *Nature* **453,** 155–155 (2008).
5. Van Vuuren, D. P. & Riahi, K. *Climatic Change* **91,** 237–248 (2008).
6. Peters, G. P. *et al. Nature Clim. Change* **2,** 2–4 (2012).
7. Friedlingstein, P. *et al. Nature Clim. Change* **1,** 457–461 (2011).
8. Schneider, S. H. & Thompson, S. L. *J. Geophys. Res.* **86,** 3135–3147 (1981).
9. Rogelj, J., Meinshausen, M. & Knutti, R. *Nature Clim. Change* **2,** 248–253 (2012).
10. Le Quéré, C. *et al. Nature Geosci.* **2,** 831–836 (2009).
11. Raupach, M. R. *et al. Proc. Natl Acad. Sci.* **104,** 10288–10293 (2007).
12. GEA *Global Energy Assessment — Toward a Sustainable Future* (Cambridge Univ. Press & IIASA, 2012).
13. Van Vliet, J. *et al. Climatic Change* **113,** 551–561 (2012).
14. UNEP *Bridging the Emissions Gap* (UNEP, 2011).
15. Rogelj, J. *et al. Nature Clim. Change* **1,** 413–418 (2011).
16 Jakob, M., Luderer, G., Steckel, J., Tavoni, M. & Monjon, S. *Climatic Change* **114,** 79–99 (2012).
17. Clarke, L. *et al. Energy Econ.* **31** (Supplement 2), S64–S81 (2009).
18. Peters, G. P., Minx, J. C., Weber, C. L. & Edenhofer, O. *Proc. Natl Acad. Sci.***108,** 8903–8908 (2011).
19. Wilson, C., Grubler, A., Gallagher, K. S. & Nemet, G. F. *Nature Clim. Change* **2,** 780–788 (2012).

Published online: xx December 2012

nature climate change

PERSPECTIVE

PUBLISHED ONLINE: 21 SEPTEMBER 2014 | DOI: 10.1038/NCLIMATE2384

Sharing a quota on cumulative carbon emissions

Michael R. Raupach[1]*, Steven J. Davis[2], Glen P. Peters[3], Robbie M. Andrew[3], Josep G. Canadell[4], Philippe Ciais[5], Pierre Friedlingstein[6], Frank Jotzo[7], Detlef P. van Vuuren[8,9] and Corinne Le Quéré[10]

Any limit on future global warming is associated with a quota on cumulative global CO_2 emissions. We translate this global carbon quota to regional and national scales, on a spectrum of sharing principles that extends from continuation of the present distribution of emissions to an equal per-capita distribution of cumulative emissions. A blend of these endpoints emerges as the most viable option. For a carbon quota consistent with a 2 °C warming limit (relative to preindustrial levels), the necessary long-term mitigation rates are very challenging (typically over 5% per year), both because of strong limits on future emissions from the global carbon quota and also the likely short-term persistence in emissions growth in many regions.

Climate modelling studies[1–6] have established a robust near-linear relationship between global warming and cumulative CO_2 emissions since industrialization. This implies that a 'carbon quota' or cap on future cumulative CO_2 emissions is required [**Au: OK?**] if global warming is to be kept below any nominated limit (such as 2 °C above preindustrial temperatures[7]) with a nominated chance of success[8–10]. Accounting for the combined effects of CO_2, non-CO_2 gases and other agents, such as aerosols, quotas on all-time cumulative CO_2 emissions of approximately 3,500 and 3,200 Gt CO_2 are necessary to restrict global warming to less than 2 °C above preindustrial temperatures with a 50% and 66% chance of success, respectively[10]. These quotas are significantly smaller than the known global fossil-fuel reserves[2,11,12].

The carbon quota implies that future cumulative CO_2 emissions consistent with a given warming limit are a finite common global resource that must necessarily be shared among countries, whether through prior agreement or as an emergent property of individually determined national efforts. The problem of sharing the global mitigation effort is addressed in an extensive literature, from the perspectives of equity, international policy and institutions, and economics and financing[13–22]. Here, we combine perspectives from two previously distinct strands of analysis — the global carbon quota and effort sharing — to infer the regional and national implications of global carbon quotas under a wide range of possible sharing strategies.

The need for multiple approaches is heightened by the present impasse in the search for long-term climate safety. Two broad approaches have been pursued hitherto in international negotiations: 'top-down' international agreements, such as the 1997 Kyoto Protocol[23], and 'bottom-up' nationally determined contributions to a global outcome. The top-down approach has stalled over nearly two decades[24]. An approach based on nationally determined contributions is now being explored[25], but current commitments in sum are far short of what is needed to meet internationally agreed climate goals[26–29].

The present impasse arises fundamentally because the sharing challenge forms a 'tragedy of the commons'[30] or collective-action dilemma[31]. The challenge of governing common natural resources has developed a rich literature encompassing issues of governance, institutions, communities and ethics[32–34]. In broad terms, this literature suggests that solutions to the underlying problem of collective action can emerge from individual actions by participants (here, countries), given adequate social capital[35] to support a framework for adaptive governance[33]. When the sharing challenge is framed in this way, the emphasis shifts away from questions about global rules ("What shares of the carbon quota should be allocated to every country?") to questions about consistent local behaviours ("If others acted consistently with our proposed share of the carbon quota, would the global outcome be acceptable to us?"). This perspective further motivates a direct connection between the global carbon quota and effort-sharing analyses, to explore frameworks that can infer the global implications of a proposed share of the carbon quota by any one country, were others to act on similar principles.

To establish principles, we focus on the sharing of fossil-fuel CO_2 emissions, the largest single contributor to radiative forcing and climate change[36]. CO_2 emissions from land-use change are now a relatively small fraction of total CO_2 emissions ($8 \pm 3\%$)[37], declining with time, and subject to significant uncertainty at the global scale and even more at regional scales[37,38]. Inclusion of CO_2 emissions from land-use change is straightforward in principle, though data uncertainties would require careful assessment. In the absence of historic attribution, the effects would be small for most regions, but large for tropical forest countries where land clearing is still ongoing. More significant at the global scale is the role of non-CO_2 forcing agents, both those accounted (the major non-CO_2 greenhouse gases) and unaccounted (aerosols) for in inventories [**Au: OK?**]. However, full inclusion of these forcing agents in extensions to carbon quotas at regional and national scales is beyond the present scope, requiring more complex climate modelling to resolve issues such as local impacts of short-lived climate

[1]Climate Change Institute, Australian National University, Canberra, Australian Capital Territory 0200, Australia, [2]Department of Earth System Science, University of California, Irvine, California, USA **[Au: please provide zip code]**, [3]Center for International Climate and Environmental Research – Oslo (CICERO), Norway **[Au: please provide postal address including postal code]**, [4]Global Carbon Project, Oceans and Atmosphere Flagship, Canberra, Australian Capital Territory 2601, Australia, [5]IPSL-LSCE, CEA CNRS UVSQ, Centre d'Etudes Orme des Merisiers, 91191 Gif sur Yvette, France, [6]College of Engineering, Mathematics and Physical Sciences, University of Exeter, Exeter EX4 4QF, UK, [7]Crawford School of Public Policy, Australian National University, Canberra, Australian Capital Territory 0200, Australia, [8]PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, AH Bilthoven, The Netherlands **[Au: please provide postal code]**, [9]Copernicus Institute of Sustainable Development, Faculty of Geosciences, Utrecht University, Utrecht, The Netherlands **[Au: please provide postal code]**, [10]Tyndall Centre for Climate Change Research, University of East Anglia, Norwich Research Park, Norwich NR4 7TJ, UK.
*e-mail: michael.raupach@anu.edu.au

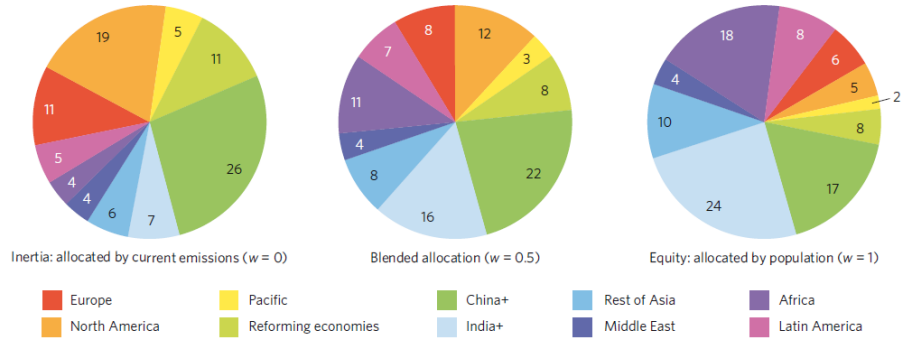


Figure 1 | Sharing the carbon-quota pie. The share of an available carbon quota allocated to 10 regions (Europe, North America, Pacific Organisation for Economic Co-operation and Development countries, reforming economies, China+, India+, Rest of Asia, Middle East, Africa, Latin America) under three sharing principles based on equation (2), with sharing index $w = 0$, 0.5 and 1. Numbers give the percentage share of the global quota allocated to each region, summing to 100 for each chart. Shares are calculated using equation (2) with emissions (f_j) averaged over last five years of data, and population (p_j) averaged over a five-year period centred on the time at which world population reaches 9 billion. See Supplementary Text 1 (Methods) for details.

forcers[39,40], nonlinear force–response relationships[41] and cooling by some aerosol species[36].

Ways of sharing a cumulative emissions quota

A common-pool resource can be shared objectively among participants in a social–ecological system by distributing the resource according to a set of observable metrics. In the case of the carbon quota, two generic metrics are measures of 'inertia' (also known as 'grandfathering'[22]) and 'equity', the inertia metric reflecting the distribution of emissions and the equity metric reflecting the population distribution. These metrics would suggest two alternative sharing principles:

$$s_j\,(\text{emissions}) = \frac{f_j}{F};\ s_j\,(\text{population}) = \frac{p_j}{P} \qquad (1)$$

where s_j is the share of the quota to country j; f_j and p_j are the emissions (current or cumulative) and population (present or future), respectively, for country j; and F and P are the corresponding emissions and population for the world. Shares sum to one over all countries ($\Sigma s_j = 1$) because $\Sigma f_j = F$ and $\Sigma p_j = P$. Depending on the choice of reference times for emissions and population, this formulation can accommodate sharing by current or historic emissions, and can account for expected future changes in population.

In their simplest forms, both options in equation (1) face major difficulties. Sharing by present emissions (inertia) would leave developing countries with little access to the energy and development opportunities embodied in remaining future carbon emissions, while sharing by population (equity) would impose extremely high mitigation demands on many developed countries. This has motivated the analysis of 'blended' sharing principles[16–18] that can compromise between the endpoint positions. One possibility (among others explored below) is that the share of the quota to country j is:

$$s_j\,(w) = (1-w)\frac{f_j}{F} + w\frac{p_j}{P} \qquad (2)$$

where w is a 'sharing index' between 0 and 1, weighting between the endpoints of sharing by inertia ($w = 0$) and by equity ($w = 1$). This principle also satisfies the requirement $\Sigma s_j = 1$. It can be regarded as a simplified form of the contraction-and-convergence algorithm[16–18], applied to a total carbon quota rather than to emissions trajectories specified through time; the key simplification is independence from specific assumptions about emissions pathways through time.

Using equation (2), Fig. 1 shows how w influences the share of a global carbon quota assigned to 10 regions that span the world (Europe, North America, Pacific Organisation for Economic Co-operation and Development countries [**Au: OK?**], reforming economies, Middle East, China+, India+, Rest of Asia, Africa, Latin America), with the 'inertia' term in equation (2) based on the current distribution of emissions and the 'equity' term based on a projected future population distribution for the mid-twenty-first century (Supplementary Text 1, Methods). The last four regions receive a greater share with increasing weighting of equity (increasing w), while the share for the other six regions decreases. This occurs because the response of the share s_j to a region j to increasing w hinges on whether its per-capita emissions (f_j/p_j) are less or greater than the global average per-capita emissions (F/P) (Supplementary Text 2); the last four regions have below-global-average per-capita emissions (Supplementary Fig. S1).

The concept of a blended sharing principle can potentially be generalized to include additional metrics of responsibility and/or capability[19,21] — for example, the distribution of gross domestic product (GDP) as a measure of capability to undertake mitigation efforts (Supplementary Text 2). The influences of emissions and GDP on sharing are broadly similar because both are correlated with development status, and both are very different to the influence of population (Supplementary Fig. S1). Therefore, we focus mainly on emissions and population using equation (2), and briefly explore later the effect of also including GDP in the sharing principle. We also note that allocated shares and quotas are not the same as actual future cumulative emissions if emissions are tradable between countries, as discussed later.

Regional carbon quotas

The global carbon quota from the past to the long-term future (when emissions fall to zero) is:

$$Q_{\text{tot}} = Q_{\text{past}}\,(\text{FFI}) + Q_{\text{past}}\,(\text{LUC}) + Q_{\text{future}}\,(\text{FFI}) + Q_{\text{future}}\,(\text{LUC}) \qquad (3)$$

where Q_{tot} is the quota for anthropogenic CO_2 emissions from a reference time (here 1870) to the far future, including contributions from fossil-fuel combustion and industrial processes (FFI) and net land-use change (LUC); Q_{past} is the past emissions and Q_{future} is the shared available future emissions. Past cumulative CO_2 emissions from 1870 to the end of 2012 were 1,922 Gt CO_2 (1,396 from FFI and 526 from LUC)[37]. Global LUC emissions have decreased since

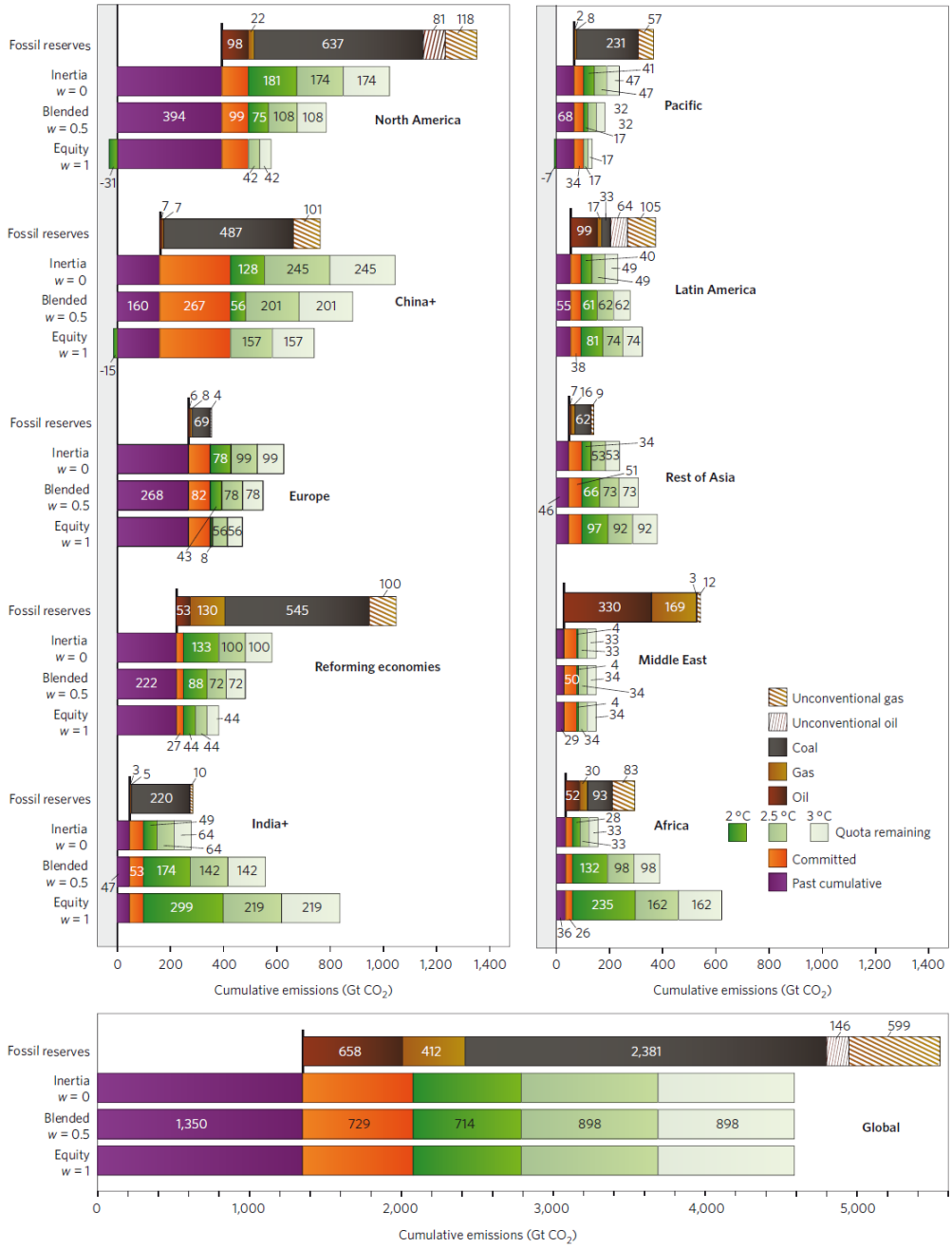


Figure 2 | Quotas, cumulative committed emissions and fossil-fuel reserves. Past cumulative fossil-fuel CO_2 emissions (purple), future committed emissions[42,44] (orange) and available fossil-fuel carbon quotas to meet warming limits of 2, 2.5 and 3 °C with 50% probability (green), for 10 regions and the world, under inertia, blended and equity sharing principles. Stacked bars are cumulative; numbers give the contribution of each increment in Gt CO_2. Negative increments are shown below the zero axis. Also shown are fossil-fuel reserves (coal, oil, gas, unconventional oil, unconventional gas)[12].

2000 to 8 ± 3% of total emissions in 2013 (ref. 37) and are expected to continue to decrease; a linear decrease to zero in 2100 would imply $Q_{future}(LUC) = 137$ Gt CO_2.

We consider here the sharing of the available quota of future fossil-fuel emissions $Q_{future}(FFI)$, henceforth Q_{avail}. The all-time carbon quota Q_{tot} is estimated[10] as 3,500 Gt CO_2 for a climate goal of keeping warming below 2 °C with 50% chance of success, accounting for both CO_2 and non-CO_2 influences (all quota estimates are rounded to nearest 100 Gt CO_2). This implies $Q_{avail} = 1{,}400$ Gt CO_2 for future FFI emissions from 2013 onwards. For warming limits of 2.5 and 3 °C at 50% chance of success, the equivalent quotas are $(Q_{tot}, Q_{avail}) = (4{,}400, 2{,}300)$ and $(5{,}300, 3{,}200)$ Gt CO_2, respectively[10].

The available carbon quota for country j is a share $q_{javail} = s_j Q_{avail}$ of the global quota. Figure 2 shows the resulting quotas for 10 regions (Fig. 1) and for the world, with shares s_j from equation (2) for three values of w (0, 0.5 and 1, corresponding to inertia-based, blended and equity-based sharing, respectively), and with available quotas Q_{avail} corresponding to warming limits of 2, 2.5 and 3 degrees at 50% chance of success. Global quotas are independent of w, but the regional quotas depend strongly on w, with increasing w causing the quotas to increase for regions with low per-capita emissions, and vice versa (Supplementary Text 2).

The regional quotas can be assessed against two independently determined quantities. First, committed emissions (orange bars in Fig. 2) are estimates of future emissions from existing CO_2-emitting infrastructure that will continue for infrastructure lifetimes without early retirement[42–44] (Supplementary Text 1). Committed emissions in North America, Europe and China exceed quotas for a 2 °C warming limit under equity sharing ($w = 1$), implying a requirement to either retire or improve such infrastructure before its design lifetime, or to compensate these emissions by negative emissions later in the century or by some form of offset such as emissions trading (see below). For the world, committed emissions are about half of the available quota Q_{avail} for a 2 °C warming limit.

Second, quotas can be compared with fossil-fuel reserves of coal, oil, gas, unconventional oil and unconventional gas (Fig. 2). Reserves are the part of total resources currently identified as economically viable for extraction. Globally and in most regions, estimated reserves[12] substantially exceed the global quota Q_{avail} for warming limits up to and beyond 3 °C, in agreement with other assessments[2,11]. Estimates of total fossil-fuel resources are even larger, implying that further exploration for new fossil-fuel reserves would not be consistent with warming limits of 3 °C or lower, in the absence of carbon sequestration[11] at very large scales.

The distribution of the mitigation challenge

A simple measure of the challenge implied by the available quota for any region or country (before any possible redistribution by emissions trading) is the time for which the quota would last if emissions were held steady at current levels until the quota is exhausted, $T_j = q_{javail}/f_j$. This 'emission time'[10] depends strongly on the sharing index w (Supplementary Fig. S2). With pure emission-based sharing ($w = 0$), the emission time for all countries is the same and equals the global emission time Q_{avail}/F. As w increases to yield pure population-based sharing at $w = 1$, the emission time increases (decreases) for regions with per-capita emissions less (greater) than the global average, as for shares (Supplementary Text 2).

If emissions were to decrease at a steady exponential rate starting immediately, an emission time T would correspond to a decrease in emissions at a fractional rate $1/T$ (or $100/T$ per cent per year). However, this estimate of a required reduction rate to meet a given quota is too low if the mitigation effort must first overcome existing emissions growth, because of persistence effects. Persistence in emissions growth arises from the time needed to implement new low-emission energy technologies on the energy supply side, and to adopt energy-efficiency measures and make behavioural changes in energy consumption on the demand side. Persistence is evident in emissions data (Supplementary Fig. S3). The supply-side aspects of this persistence arise mainly from the committed emissions in existing, long-lived energy infrastructure[42,43] (Fig. 2).

We account for persistence in emissions growth by representing the future emissions of a country, region or the world with an analytic capped-emissions trajectory that blends an initially linear growth at rate r with eventual exponential decline at a mitigation rate m. Continuity requirements determine this trajectory uniquely (Supplementary Text 3):

$$f(t) = f_0\left(1 + \left(r + m\right)t\right)\exp\left(-mt\right) \qquad (4)$$

where $f(t)$ is the emissions at time t, f_0 is the emissions at the start of mitigation ($t = 0$), and r and m both have units $1/y$. When mitigation is started at $t = 0$ (with a positive initial growth rate r), the resulting emissions trajectory increases, peaks and eventually declines exponentially at the rate m (Supplementary Fig. S4). A possible delay in

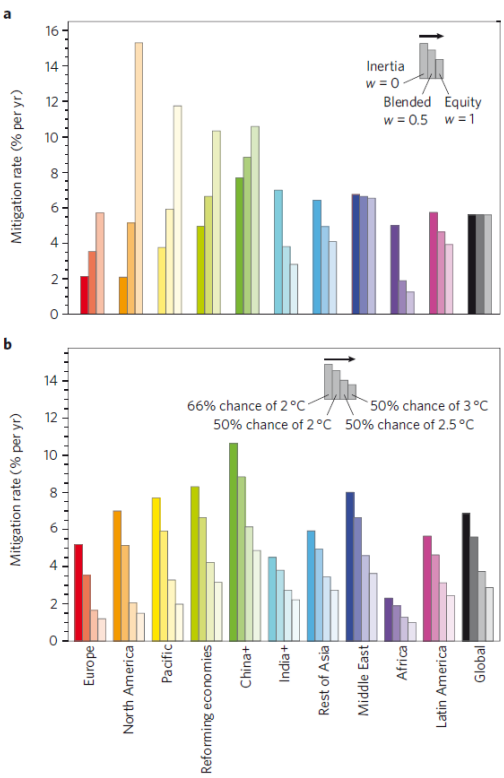


Figure 3 | Dependence of the regional mitigation challenge on the sharing index (w) and the warming limit. a, Mitigation rates for 10 regions and the world at $w = 0$, 0.5 and 1. Available global fossil-fuel combustion and industrial processes (FFI) carbon quota from 2013 is $Q_{avail} = 1{,}400$ Gt CO_2, corresponding to a 2 °C warming limit with 50% success probability. **b**, Mitigation rates under a blended sharing principle ($w = 0.5$) in four cases with (warming limit, success probability) equal to (2 °C, 50%), (2.5 °C, 50%), (3 °C, 50%) and (2 °C, 66%). The available global FFI carbon quotas for these four cases are $Q_{avail} = 1{,}400$, 2,300, 3,200 and 1,100 Gt CO_2, respectively[10].

starting mitigation can also be included (Supplementary Text 3). By incorporating such a delay, equation (4) can provide a good representation of the trajectories of CO_2 emissions from fossil fuels in the four representative concentration pathway scenarios[45] before any introduction of negative emissions (Supplementary Fig. S5). This indicates that equation (4) is suitable for empirically describing persistence effects in emissions trajectories.

To meet a specified available cumulative emission quota, persistence in emissions growth causes the necessary eventual characteristic rate of decline in emissions (m) to be typically more than twice the rate $1/T$ that would be required if exponential decline could commence immediately (Supplementary Text 3, equation (S8)). This occurs because the persistence in emissions growth in the early phase of the mitigation effort has to be compensated by more rapid later decline (larger m).

Figure 3a shows the mitigation rates m needed to meet an available carbon quota Q_{avail} = 1,400 Gt CO_2 (a 2 °C warming limit at 50% success probability), for the world and in 10 regions, for sharing index $w = 0$, 0.5 and 1. The required global mitigation rate to meet the quota is 5.5% per year (independent of sharing index) — more than twice the reduction rate $1/T$ if exponential decline could start immediately, because of persistence in emissions growth. This result is consistent with scenario-based analyses that account for policy delay[46,47].

With pure emissions-based sharing ($w = 0$), m varies little among regions (Fig. 3a); it is not identical across regions (in contrast with the emission time T; Supplementary Fig. S2) because of regional variations in the initial growth rate r. With pure population-based sharing ($w = 1$), m varies greatly among regions, from 1.4% per year (Africa) to over 15% per year (North America). With a blended sharing principle ($w = 0.5$), required mitigation rates are intermediate between the endpoint options $w = 0$ and $w = 1$, but very different in most cases from a simple average of the endpoints. For North America, the required mitigation rate at $w = 0.5$ is about 30% more than with emissions-based sharing ($w = 0$); for Africa, it is about 70% less. Therefore, a shift from an emissions-based to blended sharing principle leads to large benefits for developing regions at the cost of a much smaller increase in the demands on developed regions, as quantified by fractional changes in the required mitigation rates m.

Regional mitigation rates are also strongly sensitive to the global carbon quota, determined by the warming limit and probability of success. If the required probability of success for a 2 °C limit is increased from 50% (as in Fig. 3a) to 66%, then the required global mitigation rate m increases from 5.5 to 7% per year, with commensurate increases for regions and countries (Fig. 3b). For warming limits of 2.5 and 3 °C at 50% success probability, the required global mitigation rates fall to 3.7 and 2.9% per year, respectively, with commensurate decreases at regional and national levels. Even a 3 °C limit (with a much higher risk of dangerous climate change[48]) requires significant global and national mitigation.

To explore further the distribution of the mitigation challenge at national level, we focus on a set of 14 representative countries (Supplementary Text 1, Methods) that span the development spectrum in terms of both per-capita emissions and rates of development (Supplementary Fig. S6; a national-level counterpart of Fig. 2 is given in Supplementary Fig. S7). The required mitigation rates m for these countries, before any possible emissions trading, are plotted against present per-capita emissions in Fig. 4. Increasing equity (larger w) causes the mitigation challenge to respectively increase and decrease for countries with per-capita emissions above and below the world average, pivoting about that point. For least-developed countries with very low per-capita emissions, a shift from $w = 0$ (inertia) to 0.5 (blended) reduces the mitigation challenge from near the world average to near zero, because these countries collectively account only for a small share of global emissions.

The implication is that a blended sharing principle can avoid the opposite difficulties associated with the endpoint sharing principles

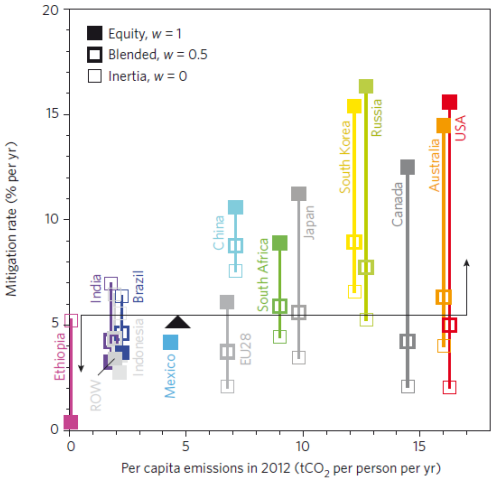


Figure 4 | Distribution of the mitigation challenge among countries. Mitigation rates (m) for 14 countries and regions spanning the development spectrum and for the whole world, with sharing index $w = 0$ (open squares), 1 (filled squares) and 0.5 (half-open squares). Horizontal axis is 2012 per-capita fossil-fuel CO_2 emissions. Available global fossil-fuel carbon quota from 2013 is Q_{avail} = 1,400 Gt CO_2, corresponding to a 2 °C warming limit with 50% success probability. With increasing equity in the sharing principle, the mitigation challenge increases for countries to the right of the point for the world (the pivot for the see-saw) and decreases for countries to the left. Mexico is so close to the pivot that symbols are indistinguishable. ROW = rest of world; EU28 = the 28 member states of the European Union. **[Au: definitions OK?]**

at $w = 0$ (which would be prohibitive for least-developed countries) or $w = 1$ (which would be prohibitive for developed countries because of required mitigation rates exceeding 15% per year). Such compromises will be necessary in applying "equity principles of responsibility and capability to apportion the burden of emissions reductions [and] address concerns of both the global North and South"[24].

Together, Figs 3 and 4 demonstrate the interplay between the three major factors determining the required regional and national mitigation rates: the warming limit, the nominated chance of success and the sharing principle (here w). The first two are comparably important everywhere. The sharing principle (w) has dominant but opposite effects for countries at opposite ends of the development spectrum, but small effects for countries close to the pivot point defined by global-average per-capita emissions (Fig. 4). In particular, China has a high required mitigation rate (because of currently high emissions growth) that is not strongly sensitive to the choice of w.

Additional factors

To this point, we have not yet considered several additional factors that can be assessed within the framework of equation (2) or its generalizations (Supplementary Text 3) as part of future climate policy regimes.

Extent of inclusion of historic emissions. It has been suggested[41,49,50] that historic responsibility for climate change be included in principles for sharing the mitigation challenge. In a carbon-quota approach, this involves defining an attribution start date in the past and then sharing cumulative global emissions from that time onwards rather than from the present (Supplementary Text 4). A shift to this sharing principle has no effect on the required

global mitigation rates, but has large implications for regions and countries. With historic attribution, required mitigation rates for developed regions become very large because the attributed historic emissions approach (or even exceed) allocated shares for future emissions (Supplementary Fig. S8). The corresponding benefits for developing regions are not as large as might be expected because historic emissions for these regions are low.

Effect of delaying mitigation. It is well known that a delay in starting mitigation has a profound effect on the steepness of the mitigation challenge[51,52]. Noting that our analysis already includes persistence before a peak in emissions is reached, an additional 10-year delay would increase the required global mitigation rate m from 5.8 to over 9% per year (with global quota Q_{avail} = 1,400 Gt CO_2), with commensurate increases in regions (Supplementary Fig. S9).

Consumption-based and territorial emissions accounting. Consumption-based inventories for national CO_2 emissions[53] augment established territorial inventories[54] by attributing emissions to countries where products are consumed rather than where emissions of manufacture occur[55–57]. Under consumption-based accounting, the emissions of manufacturing-export countries, such as China, are reduced by up to 20% in recent years (relative to territorial accounting) and emissions of importing countries are correspondingly increased[37,58]. Use of consumption-based rather than territorial emissions leads to only a small change in shares and mitigation rates for regions and countries (Supplementary Fig. S10), because the favourable effects of consumption-based accounting for manufacturing-export countries are offset by the effects of their typically high persistence in emissions growth. Still, consumption-based emissions accounting may contribute to negotiation of agreements[24].

Effect of timing of population distribution. Sharing by population can be based on a future population forecast (the default for this Perspective; Supplementary Text 1), or on the present population distribution. There is only a small sensitivity of required mitigation rates to whether sharing occurs on the population distribution at a future time when the global population is 9 billion, or on the distribution in 2013 with a global population of 7 billion (Supplementary Fig. S11).

Effect of including GDP in the sharing principle. Equation (2) can be generalized to include additional metrics such as GDP (Supplementary Text 2). If the emissions distribution in equation (2) is replaced completely with the GDP distribution, the resulting effect on shares and mitigation rates is moderate, but not large (Supplementary Fig. S12), because both emissions and GDP are correlated with development status. Sharing principles combining three or more metrics (emissions, GDP, population, and so on) can be constructed (Supplementary Text 2). The most important clusters of metrics are those that represent development status (such as emissions and GDP) and those representing population.

Negative emissions. Model-based scenario studies indicate pathways to a range of warming limits, through transformations in energy systems and other mitigation measures[13]. For limits around 2 °C or less, such scenarios often depend on the use of negative emissions[13,59,60] through strategies such as land-based biosequestration or bioenergy with carbon capture and storage. Most 2 °C scenarios propose significant gross negative emissions to offset gross positive emissions that may be difficult or impossible to avoid, and many propose net negative emissions from the late twenty-first century. To the extent that gross negative emissions offset gross positive emissions, they are handled naturally by the cumulative carbon quota approach because the carbon quota applies to net (gross positive less gross negative) emissions. This applies at regional and national scales just as at the global scale.

Shared responsibility and collective achievability

A longstanding idea in analyses of burden sharing has been that countries need to test and explain how their own nominated climate goals fit with a global outcome[16,20,22,61,62]. Engagement in such testing is a key requirement for a robust solution to the climate change challenge through adaptive governance. As a methodological contribution to assist in this kind of testing, the present work combines existing analyses of the global carbon quota and effort sharing. The carbon-quota approach offers the important simplification of independence from assumptions about emissions pathways in time, yielding a transparent methodology for translating global to national carbon quotas under a wide range of possible sharing principles.

The question of achievability is clearly central[13]. The required global mitigation rates emerging from our analysis are high, typically over 5% per year for a 2 °C limit at 50% success probability (and 8% per year for China, a rate that remains very high under any sharing principle; Fig. 4). These rates can be compared with the distribution of maximum mitigation rates predicted by the ensemble of scenarios in the Intergovernmental Panel on Climate Change fifth assessment report (Supplementary Fig. S13). For scenarios with CO_2 peaking below 530 ppm, the median of the distribution of maximum rate of emissions decline is approximately consistent with the required rates from our analysis if there is no delay in starting mitigation, but even a five-year delay causes the required rate to approach the upper edge of the distribution.

While the global quota is determined biophysically, the resulting distribution of effort among countries can be made more achievable by emissions or quota trading and related instruments. These can help to make very high national mitigation targets achievable, given sufficient globally connected trading systems and an effective price on emissions. Quota trading means that an initial quota does not determine the actual future cumulative emissions for a country; it also can improve the overall cost-effectiveness of the global mitigation effort, and facilitate transfer payments between countries to help achieve desired distributional outcomes. It is an open question whether such payments can be actually implemented on a large scale.

For the emergence of long-term, cooperative solutions to anthropogenic climate change[33,35], one essential element is an ability to perceive the consistent global consequences of local actions, given great differences in national economies and histories. The social capital that underpins cooperative governance of the commons takes time to evolve, but the biophysical realities of climate change demand solutions within decades. This is why the development of new perspectives on the sharing challenge is vital.

Received 30 June 2014; accepted 27 August 2014;
published online 21 September 2014

References

1. Allen, M. R. *et al.* Warming caused by cumulative carbon emissions: towards the trillionth tonne. *Nature* **458**, 1163–1166 (2009).
2. Meinshausen, M. *et al.* Greenhouse gas emission targets for limiting global warming to 2 °C. *Nature* **458**, 1158–1162 (2009).
3. Zickfeld, K., Eby, M., Matthews, H. D. & Weaver, A. J. Setting cumulative emissions targets to reduce the risk of dangerous climate change. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **106**, 16129–16134 (2009).
4. Matthews, H. D., Gillett, N. P, Stott, P. A. & Zickfeld, K. The proportionality of global warming to cumulative carbon emissions. *Nature* **459**, 829–833 (2009).
5. Raupach, M. R. *et al.* The relationship between peak warming and cumulative CO_2 emissions, and its use to quantify vulnerabilities in the carbon–climate–human system. *Tellus B* **63**, 145–164 (2011).
6. Raupach, M. R. The exponential eigenmodes of the carbon–climate system, and their implications for ratios of responses to forcings. *Earth Syst. Dynam.* **4**, 31–49 (2013).
7. European Commission *The 2 °C Target: Background on Impacts, Emission Pathways, Mitigation Options and Costs* (European Commission, 2008).

8. Collins, M. *et al.* in *IPCC Climate Change 2013: The Physical Science Basis* (eds Stocker, T. F. *et al.*) Ch. **12**, 1029–1136 (Cambridge Univ. Press, 2013).
9. Matthews, H. D., Solomon, S. & Pierrehumbert, R. Cumulative carbon as a policy framework for achieving climate stabilization. *Phil. Trans. R. Soc. A* **370**, 4365–4379 (2012).
10. Friedlingstein, P. *et al.* Persistent growth of CO_2 emissions and implications for reaching climate targets. *Nature Geosci.* (in the press).
11. GEA *Global Energy Assessment — Toward a Sustainable Future* (Cambridge Univ. Press and International Institute for Applied Systems Analysis, 2012). [**Au: publishers correct as added?**].
12. BGR *Energy Study 2013: Reserves, Resources and Availability of Energy Resources* (Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, 2013).
13. Clarke, L. *et al.* in *IPCC Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change* (eds Edenhofer, O. *et al.*) Ch. 6 (Cambridge Univ. Press, 2014).
14. Stavins, R. *et al.* in *IPCC Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change* (eds Edenhofer, O. *et al.*) Ch. 13 (Cambridge Univ. Press, 2014).
15. Höhne, N., den Elzen, M. G. J. & Escalante, D. Regional GHG reduction targets based on effort sharing: a comparison of studies. *Clim. Policy* **14**, 122–147 (2014).
16. Meyer, A. *Contraction and Convergence. The Global Solution to Climate Change* Schumacher Briefings 5 (Green Books, 2000).
17. Hohmeyer, O. & Rennings, K. *Man-made Climate Change: Economic Aspects and Policy Considerations* (ZEW Economic Studies, Centre for European Economic Research, 1999).
18. Bows, A. & Anderson, K. Contraction and convergence: an assessment of the CCOptions model. *Climatic Change* **91**, 275–290 (2008).
19. Dellink, R. *et al.* Sharing the burden of financing adaptation to climate change. *Glob. Environ. Change* **19**, 411–421 (2009).
20. Bartsch, U. & Müller, B. *Fossil Fuels in a Changing Climate — Impacts of the Kyoto Protocol and Developing Country Participation* (Oxford Univ. Press, 2000).
21. Füssel, H-M. How inequitable is the global distribution of responsibility, capability, and vulnerability to climate change: a comprehensive indicator-based assessment. *Glob. Environ. Change* **20**, 597–611 (2010).
22. Ringius, L., Torvanger, A. & Underdal, A. Burden sharing and fairness principles in international climate policy. *Int. Environ. Agreem. P.* **2**, 1–22 (2002).
23. UNFCCC *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change* (United Nations Framework Convention on Climate Change, 1997).
24. Grasso, M. & Roberts, T. A compromise to break the climate impasse. *Nature Clim. Change* **4**, 543–549 (2014).
25. European Climate Foundation *Taking Stock — The Emission Levels Implied by the Pledges to the Copenhagen Accord* (European Climate Foundation, 2010).
26. Den Elzen, M. G. J. *et al.* The Copenhagen Accord: abatement costs and carbon prices resulting from the submissions. *Environ. Sci. Policy* **14**, 28–39 (2011).
27. Rogelj, J. *et al.* Analysis of the Copenhagen Accord pledges and its global climatic impacts — a snapshot of dissonant ambitions. *Environ. Res. Lett.* **5**, (2010). [**Au: please provide page range or article number**].
28. Rogelj, J. *et al.* Copenhagen Accord pledges are paltry. *Nature* **464**, 1126–1128 (2010).
29. UNEP *The Emissions Gap Report 2013* (United Nations Environment Program, 2013).
30. Hardin, G. The tragedy of the commons. *Science* **162**, 1243–1248 (1968).
31. Kolstad, C. *et al.* in *IPCC Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change* (eds Edenhofer, O. *et al.*) Ch. 3 (Cambridge Univ. Press, 2014).
32. Ostrom, E. *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action* (Cambridge Univ. Press, 1990).
33. Dietz, T., Ostrom, E. & Stern, P. C. The struggle to govern the commons. *Science* **302**, 1907–1912 (2003).
34. Lejano, R. P., Araral, E. & Araral, D. Interrogating the commons: introduction to the Special Issue. *Environ. Sci. Policy* **36**, 1–7 (2014).
35. Pretty, J. Social capital and the collective management of resources. *Science* **302**, 1912–1914 (2003).
36. Myhre, G. *et al.* in *IPCC Climate Change 2013: The Physical Science Basis* (eds Stocker, T. F. *et al.*) Ch. **8**, 659–740 (Cambridge Univ. Press, 2013).
37. Le Quéré, C. *et al.* Global carbon budget 2013. *Earth Syst. Sci. Data* **6**, 235–263 (2014).
38. Gasser, T. & Ciais, P. A theoretical framework for the net land-to-atmosphere CO_2 flux and its implications in the definition of "emissions from land-use change". *Earth Syst. Dynam.* **4**, 171–186 (2013).
39. Shindell, D. & Faluvegi, G. Climate response to regional radiative forcing during the twentieth century. *Nature Geosci.* **2**, 294–300 (2009).
40. Berntsen, T. K. *et al.* Response of climate to regional emissions of ozone precursors: sensitivities and warming potentials. *Tellus B* **57**, 283–304 (2005).
41. Trudinger, C. M. & Enting, I. G. Comparison of formalisms for attributing responsibility for climate change: non-linearities in the Brazilian proposal approach. *Climatic Change* **68**, 67–99 (2005).
42. Davis, S. J., Caldeira, K. & Matthews, H. D. Future CO_2 emissions and climate change from existing energy infrastructure. *Science* **329**, 1330–1333 (2010).
43. Davis, S. J. & Socolow, R. H. Commitment accounting of CO_2 emissions. *Environ. Res. Lett.* (in the press). [**Au: any update?**].
44. Davis, S. J., Peters, G. P. & Caldeira, K. The supply chain of CO_2 emissions. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **108**, 18554–18559 (2011).
45. van Vuuren, D. P. *et al.* The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* **109**, 5–31 (2011).
46. Kriegler, E. *et al.* The role of technology for achieving climate policy objectives: overview of the EMF 27 study on global technology and climate policy strategies. *Climatic Change* (in the press). [**Au: any update?**].
47. Riahi, K. & Kriegler, E. Locked into Copenhagen pledges — implications of short-term 386 emission targets for the cost and feasibility of long-term climate goals. *Technol. Forecast. Soc.* (in review). [**Au: has this now been accepted? If not, reference will need to be moved to the main text and cited as 'manuscript in preparation' and references renumbered accordingly**].
48. Schellnhuber, H. J., Cramer, W., Nakicenovic, N., Wigley, T. M. L. & Yohe, G. *Avoiding Dangerous Climate Change* (Cambridge Univ. Press, 2006).
49. Den Elzen, M. G. J. *et al. The Brazilian Proposal and Other Options for International Burden Sharing: An Evaluation of Methodological and Policy Aspects using the FAIR Model* (National Institute of Public Health and the Environment, 1999).
50. Den Elzen, M. G. J., Schaeffer, M. & Lucas, P. L. Differentiating future commitments on the basis of countries' relative historical responsibility for climate change: uncertainties in the 'Brazilian proposal' in the context of a policy implementation. *Climatic Change* **71**, 277–301 (2005).
51. Den Elzen, M. G. J., van Vuuren, D. P. & van Vliet, J. Postponing emission reductions from 2020 to 2030 increases climate risks and long-term costs. *Climatic Change* **99**, 313–320 (2010).
52. Stocker, T. F. The closing door of climate targets. *Science* **339**, 280–282 (2013).
53. Peters, G. P., Minx, J. C., Weber, C. L. & Edenhofer, O. Growth in emission transfers via international trade from 1990 to 2008. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **108**, 8903–8908 (2011).
54. Andres, R. J. *et al.* A synthesis of carbon dioxide emissions from fossil-fuel combustion. *Biogeosciences* **9**, 1845–1871 (2012).
55. Peters, G. P. & Hertwich, E. G. CO_2 embodied in international trade with implications for global climate policy. *Environ. Sci. Technol.* **42**, 1401–1407 (2008).
56. Hertwich, E. G. & Peters, G. P. Carbon footprint of nations: a global, trade-linked analysis. *Environ. Sci. Technol.* **43**, 6414–6420 (2009).
57. Davis, S. J. & Caldeira, K. Consumption-based accounting of CO_2 emissions. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **107**, 5687–5692 (2010).
58. Peters, G. P. *et al.* Rapid growth in CO_2 emissions after the 2008–2009 global financial crisis. *Nature Clim. Change* **2**, 2–4 (2011).
59. Azar, C., Lindgren, K., Larson, E. & Mollersten, K. Carbon capture and storage from fossil fuels and biomass — costs and potential role in stabilizing the atmosphere. *Climatic Change* **74**, 47–79 (2006).
60. van Vuuren, D. P. & Riahi, K. The relationship between short-term emissions and long-term concentration targets. *Climatic Change* **104**, 793–801 (2011).
61. Garnaut, R. *Garnaut Climate Change Review: Final Report* (Cambridge Univ. Press, 2008).
62. Garnaut, R. *The Garnaut Review 2011: Australia in the Global Response to Climate Change* (Cambridge Univ. Press, 2011).

Acknowledgements

M.R.R. and J.G.C. acknowledge support from the Australian Climate Change Science Program of the Department of Environment, Australian Government. G.P.P. and R.M.A. were supported by the Norwegian Research Council (236296). P.C. acknowledges support from the European Commission's 7th Framework Programme under Grant Agreements 603864 (HELIX) and the ERC Synergy Project P-IMBALANCE. P.F. was supported by the European Commission's 7th Framework Programme under Grant Agreements 282672 (EMBRACE) and 603864 (HELIX). C.L.Q. was supported by the UK Natural Environment Research Council (NERC)'s International Opportunities Fund (project NE/103002X/1) and EU/FP7 project GEOCarbon (283080). The authors are grateful to C. Wilson and H. Ransan-Cooper for insightful comments. This work is a contribution to the Global Carbon Project (www.globalcarbonproject.org).

Author contributions

M.R.R. designed the study, carried out calculations and coordinated the conception and writing of the paper. S.J.D. contributed data on committed emissions and drew figures. G.P.P. and R.M.A. contributed data on committed emissions and resources. All authors contributed to the writing of the paper.

Additional information

Supplementary information is available in the online version of the paper. Reprints and permissions information is available online at www.nature.com/reprints. Correspondence and requests for materials should be addressed to M.R.R.

Competing financial interests

The authors declare no competing financial interests.

Le ballet du carbone et le fouet du marché[2]

I. Le ballet des éléments en traces

Primo Levi évoque le carbone dès les premières lignes du *Système périodique*[3] et lui consacre le dernier chapitre.

> *C'est vers le carbone, élément de la vie, que se tournait mon premier rêve littéraire, un rêve insistant, à une heure et en un lieu où ma vie ne valait pas grand-chose : oui, je voulais raconter l'histoire d'un atome de carbone.*

Primo Levi fait ainsi le récit de l'histoire imaginée d'un atome particulier depuis deux siècles, à partir du moment où il a été arraché à un gisement calcaire. Le passage en traces à l'état de dioxyde et à deux reprises l'absorption chlorophyllienne sont au centre du chapitre culminant de l'admirable alchimie littéraire et autobiographique que constitue l'ouvrage :

> *L'anhydride carbonique – forme aérienne du carbone dont nous avons parlé jusqu'ici - ce gaz qui constitue la matière première de la vie, la provision permanente dans laquelle puise toute ce qui croît, et l'ultime destin de notre chair, n'est pas un des composants principaux de l'air, mais un ridicule déchet, une « impureté » trente fois moins abondante que l'argon dont personne ne perçoit la présence… A l'échelle humaine, c'est une acrobatie chargée d'ironie, un tour de jongleur, une incompréhensible ostentation d'omniprésence arrogante, puisque c'est de cette impureté de l'air toujours renouvelée que nous venons – nous les animaux et nous les plantes, et nous l'espèce humaine, avec nos quatre milliards d'opinions discordantes, nos millénaires d'histoire, nos guerres, nos hontes et nos noblesses et notre orgueil.*

Le carbone suit en effet un cycle biogéochimique complexe, connu quantitativement avec des incertitudes importantes pour tout ce qui est en sous-sol.

Le CO2 est la clé de la vie végétale, de la vie tout court. Le méthane est aussi un produit du vivant.

En traces, il contribue à l'effet de serre et à l'acidification des océans ; la combustion de produits carbonés produit des composés cancérigènes (molécules hexagonales chlorées comme les dioxines, la nicotine) et des médicaments. Une infime partie du carbone terrestre constitue des matériaux exceptionnels : les fibres, le diamant.

---

[2] Cet article, reproduit dans les actes et complété par les citations de Primo Levi correspond à une intervention qui a suivi celles de Hervé le Treut et de Emmanuel Leroy-Ladurie

[3] Primo Levi : *Le système périodique*, réédition en Livre de poche.
Les vingt-et-un chapitres de l'ouvrage sont composés chacun d'un récit sur un élément de la classification de Mendeleïev (qui en compte une petite centaine) choisi pour sa correspondance symbolique avec l'histoire de sa vie, enchâssés dans une composition complexe qui rappelle celle de Georges Perec, passionné lui aussi de classification, de *La vie Mode d'emploi*. *Le Système périodique*, rédigé par Levi au début des années 1970, et édité par son ami et conseiller Italo Calvino, parait en 1975, dix-sept ans après la publication pour large public de *Si c'est un homme*. Jusque là témoin, il devient écrivain, jouant de toutes les cordes du métier et mettant en abyme ses confrontations, de chimiste, avec ses collègues et le monde. Un codétenu d'Auschwitz authentifiera le fait que l'écrivain lui avait alors parlé de son intention d'écrire un récit sur le carbone, récit dont Primo Levi publiera trente ans après une première version qu'il reprendra pour en faire l'ultime chapitre du livre. Celui-ci s'ouvre avec l'argon, gaz rare (trente dois moins que le CO2 souligne Levi) qui évoque pour lui ses ancêtres ; le cérium, au centre de la cohorte, et le vanadium, qui précède le carbone, portent témoignage de la déportation.

Le silicium : un monde alternatif (possible) de celui du carbone (Louis Armand, allusions de Primo Levi). En traces, il est la cause de la silicose et des maladies de l'amiante. Il est un matériau de base de l'électronique, des couches mono moléculaires des panneaux solaires.

Beaucoup d'autres éléments sont présents à faibles teneurs, comme :

- Le soufre : deux odeurs: les pluies acides, les algues vertes
- L'ozone, molécule de trois atomes d'oxygène : parasol bénéfique dans la stratosphère et brouillard maléfique au sol
- Les gaz rares comme l'argon qui ouvre le premier chapitre du *Système périodique*
- Les terres rares dont la Chine s'est assuré un quasi monopole de production
- Certains métaux lourds, toxiques au dessus d'un seuil faible[4]
- Les éléments radioactifs

Les traces ont pour origine tantôt des fuites et des combinaisons peu fréquentes dans les cycles des éléments majeurs de l'écorce terrestre, tantôt des éléments rares dans sa composition. Elles circulent dans les sols, l'eau et l'atmosphère, avec des mobilités, des stabilités des molécules, très différenciées alors que leur détection et les modèles de diffusion sont affectés de très grandes incertitudes. D'où le soupçon, les rumeurs, les paniques, d'autant plus troublants que l'épidémiologie des effets des faibles doses, fondée sur des modèles rarement validés, est encore plus controversée. La vie dans le passé géologique de deux milliards d'années a pu, par exemple, initier des processus de tolérance, de réparation de l'ADN par exemple. La sensibilité croissante des mesures accroît les anxiétés et les seuils règlementaires suivent les performances analytiques.

Principe de gestion est clair sinon facile à appliquer : contrôler les fuites, les déchets de l'extraction et du cycle de transformation, puis recycler autant que possible et à défaut confiner plutôt que disperser les déchets « ultimes ».

Revenons au carbone. Un malentendu est entretenu dans l'opinion publique, sur cet élément qui, loin d'être un polluant, est la brique et l'aliment de la vie. Une société « dé carbonée » est un pur fantasme, la marque d'une fixation sur l'acteur du ballet qui en est la figure centrale ; d'ailleurs pourquoi s'en prendre à l'atome de carbone et non aux deux d'oxygène, rêver d'une société « désoxygénée » ? En fait c'est la baisse des teneurs en CO2 qui a menacé au cours du passé géologique récent le monde végétal obligé de s'adapter. A-t-on bien apprécié les effets d'un environnement qui sera à la fois « sur-carboné », un peu plus chaud et siège d'une circulation accrue de l'eau, trois caractéristiques propres à stimuler, au niveau planétaire, et au terme de processus d'adaptations complexes, la vie, la biodiversité et l'évolution ?Et les a-t on comparés à ceux d'une dématérialisation dans le tout numérique, l'électronique, l'invisible, les soupçons de risques jamais éprouvés dans le passé, si lointain soit-il.

II. les monstruosités de la concentration et les dragons de l'énergie

[4] Voir *Contamination des sols par les éléments en traces : les risques et leur gestion*. Rapport à l'Académie des sciences, aout 1998 par Paul-Henri Bourrelier et Jacques Bertelin, coordonateurs.

Les deux sources d'énergie, l'une interne, géothermique, et l'autre externe, solaire et cosmique, sont toutes deux diluées lorsqu'elles atteignent notre mince couche de biosphère (10 km d'épaisseur), puis se concentrent partiellement. Ces concentrations aboutissent inévitablement à des dissipations et à des chaos locaux. La vie est née de là, par le jeu de l'auto organisation biologique[5].

Cette fois, c'est l'eau qui constitue le vecteur thermodynamique clé par ses changements d'état et sa mobilité. Cependant son comportement - masse et répartition de la vapeur d'eau, principal gaz à effet de serre, formation et effets des nuages aux caractéristiques variées, oscillations océaniques…,- échappe de toutes parts aux linéarités des modèles climatiques.

Les aléas naturels extrêmes qui résultent de ces dissipations peuvent être caractérisés en probabilité par des lois de puissance qui sont bornées par des phénomènes de saturation (exemple les cyclones) ou par les dimensions terrestres (volcans, séismes et tsunamis) qui ont l'effet salvateur d'imposer des limites à l'intensité des déchaînements naturels.

Les grands gisements sont aussi des anomalies, monstruosités phénoménologiques, au terme de mécanismes lents de concentration pilotés par la thermodynamique et la présence d'eau. Ils représentent des ressources exceptionnelles, exploitées en priorité. Vient le moment où ils sont épuisés et où il faut faire un saut vers d'autres, ou procéder à des substitutions.

Autres concentrations encore, les sites exceptionnels sur lesquels les populations s'agglomèrent, édifient leurs installations, développent leurs activités. Les vulnérabilités s'y donnent aussi rendez-vous, et lorsque la localisation coïncide avec celle des aléas extrêmes, les risques systémiques deviennent redoutables.

La croissance aboutit ainsi inévitablement à des crises d'ajustement aux raréfactions relatives[6].

III. Le fouet du marché

Aux deux extrémités des répartitions statistiques des éléments, des énergies, des vivants et de leurs biens, les dilutions diffuses et les concentrations extrêmes sont donc porteuses de risques qui menacent l'avenir de la mince couche de biosphère et de l'espèce humaine[7]. Les changements

[5] Henri Atlan : *Le vivant post génomique*, *qu'est-ce que l'auto-organisation*, Odile Jacob, 2011.

[6] Sur la raréfaction des ressources, voir P-H Bourrelier et R. Diéthrich : *Le mobile et la planète*, Economica, 1989. Les vagues d'inquiétudes malthusiennes sont récurrentes, celle que l'on connaît actuellement succédant à celle du Club de Rome (vers 1970) ; l'analyse reste pertinente : en fait les pénuries ne sont jamais que relatives et temporaires, ce qui ne veut pas dire qu'elles ne sont jamais aiguës ni destructrices.
La libre circulation des produits a apporté une réponse provisoire aux pénuries locales qui jusqu'au XIXe siècle ont fait peser la menace de disettes en Europe. Mais la croissance nous a fait désormais entrer dans une ère de raréfactions mondiales de quelques ressources, raréfactions temporaires tant que les innovations (efficacité et substitutions), et une certaine modération de la demande, n'ont pas apporté une réponse. Des inégalités nouvelles se révèlent car ce ne sont pas les mêmes parties prenantes qui gagnent ou perdent dans le jeu de bascule : là encore le changement rapide est source de bifurcations et de risques de crises.
La ressource foncière est sans doute la plus affectée par la croissance et le changement, car l'offre et la demande sont moins élastiques que pour les produits ; alors que le nomadisme et l'émigration ont permis dans le passé une gestion traditionnelle des tensions c'est au moment de la mondialisation la plus radicale que, paradoxalement, le déplacement des personnes se heurte aux plus grandes réticences.

[7] Le risque nucléaire est lourdement présent aux deux extrémités, celui des fuites et des faibles radiations, celui des explosions de puissance exceptionnelle, y compris par suite de détournement à usage militaire. Cela

peuvent être à l'origine de bifurcations, de passage par des chaos à grande échelle. Ces extrêmes surviennent par surprise comme le souligne J.-P. Dupuy[8]. Il faut donc surveiller l'évolution des distributions statistiques des risques et détecter les queues qui enflent anormalement (ne suivent plus la loi de Gauss)[9].

Dans les situations courantes, la sécurité est assurée avec une certaine efficacité par Les règlementations et les normes accompagnées d'actions éducatives et d'efforts d'innovation. Mais face aux risques extrêmes, il faut plus. Une planification quantitative s'avère illusoire pour limiter concentrations et dispersions car elle ne résiste pas aux pressions du marché exacerbé par les raréfactions. C'est alors le marché lui-même qu'il faut canaliser car lui-même est responsable d'amplifications périlleuses des déséquilibres et des écarts, et lui seul peut mobiliser des forces à la hauteur des menaces[10].

LA BULLE DES COMBUSTIBLES FOSSILES ET DU CO2

Comment ces principes s'appliquent-ils aux combustibles fossiles et aux déchets de combustion ?

La consommation des combustibles fossiles accumulés en plusieurs millions d'années constitue une bulle qui aura duré trois à quatre siècles et aura servi de tremplin aux hommes pour faire un saut extraordinaire de développement. On peut la considérer comme un phénomène historique de transition dont la fin doit être ménagée pour gérer les risques de désastres et préparer la suite (énergies renouvelables, relais sous une forme nucléaire à n'en pas douter fort différente de la génération des centrales actuelles).

Les incertitudes à l'amont (l'approvisionnement minier) et à l'aval (déchets) du cycle d'utilisation sont élevées :

- à l'amont on ignore les quantités de ressources par tranche de coût, car l'exploration n'est jamais achevée, les ressources potentielles sont gigantesques. L'ignorance est particulièrement forte pour les ressources difficiles et coûteuses, risquées, relevant de technologies à inventer et à fiabiliser[11].

---

contribue à expliquer la crainte particulière qu'il inspire. Les énergies renouvelables comportent aussi des risques, mais du milieu du spectre et indirectes, ce qui explique qu'on n'en parle guère.

[8] Jean-Pierre Dupuy : *Penser les événements extrêmes*. Annales des Mines, numéro de janvier 2010 : *Faire face à l'incertitude*. *La panique, Petite métaphysique des tsunamis…*

[9] Plusieurs ouvrages traitent de ces distributions génératrices de risques extrêmes, par exemple Daniel Zajdenweber, *L'économie des extrêmes*, Flammarion, 2010. Voir aussi les articles de Dupuy ainsi que PH Bourrelier, *Le papillon, le cygne et les dominos*, dossier journée du 16 juin 2011, site Internet de l'AFPCN.

[10] Les émissions mondiales de CO2 et autres gaz à effet de serre ne cessent de croître depuis 1990. Qui peut croire qu'une réduction de 20% sera obtenue en 2020, et une division par deux en 2050 ? La force du marché vaut pour les produits cotés faisant l'objet de transactions financières, elle ne s'applique pas aux biens non monétarisés, notamment aux biens communs (l'eau, les ressources génétiques, l'atmosphère, par exemple), dont la « marchandisation » pose des problèmes d'éthique qu'il faut examiner cas par cas.
Soulignons que le marché reflète les équilibres instantanés et dispose d'une capacité d'anticipation à courte échéance, démultipliée par les échanges à terme, les produits dérivés, le marché de l'assurance. Par contre il est incapable de voir loin (plus de dix ans).

[11] Les ressources minières ne sont explorées et les méthodes d'extraction et traitement ne sont mises au point que pour les franges économiques. Raisonner sur les réserves déclarées est absurde : normalement elles ne correspondent pas à plus de quelques décennies d'approvisionnement. Cela n'empêche ni les déséquilibres

- à l'aval, l'incertitude porte principalement sur l'importance de l'effet climatique (réchauffement, variabilité), l'ensemble des impacts, les risques de ce qu'on a appelé des « surprises ». Le solde des impacts économiques positifs et négatifs de la hausse des teneurs en CO2 et du réchauffement semble devoir être globalement positif si le réchauffement n'est ni trop rapide ce qui compromettrait une adaptation tranquille, ni trop intense eu égard à certains effets extrêmes. Il n'est pas simple de mettre en balance ce solde à l'équilibre et les risques de ruptures pendant le changement[12].

Cependant, la plupart des études prospectives, déjà difficiles en raison de ces incertitudes, sont entachées du défaut congénital de ne concerner que l'une ou l'autre des deux extrémités du cycle.

Faisant exception, deux experts, Henri Prévot, ingénieur des mines et Adolphe Nicolas, géologue[13], ont tenté, dans des publications récentes, cette approche globale. Ils aboutissent à des conclusions radicalement opposées. Il y a une raison simple à cette divergence spectaculaire qui fait penser aux prescriptions des médecins du temps de Molière qui ignoraient les régulations du corps humain : toutes les études, et les leurs ne font pas exception, évoquent les mouvements des prix sans pouvoir les articuler de façon appropriée au marché par ignorance des comportements chaotiques de celui-ci en phase de raréfaction. Tant qu'un effort d'élucidation et de modélisation du marché, équivalent à celui qui a été appliqué au climat, n'aura pas été réalisé, un outil essentiel fera défaut.

Beaucoup de professionnels estiment que le jeu se fera au cours des prochaines décennies autour d'un prix de l'ordre de 120 dollars le baril de pétrole qui permet à la fois de modérer la demande

---

temporaires lorsque les investissements ne sont pas faits au bon moment, ni les fantasmes de pénuries définitives (exemple du minerai de fer).

Sur les ressources en pétrole et en gaz, voir le remarquable numéro d'octobre 2011 des Annales des Mines : *Les Hydrocarbures du futur*. Les auteurs insistent unanimement sur les incertitudes relatives aux évaluations, aux coûts techniques, aux risques et à l'acceptabilité sociale et écologique.

[12]Références : - les *Rapports* du GIEC, notamment le *Rapport spécial sur les événements extrêmes et les risques de désastres*- Paul-Henri Bourrelier : « Copenhague : un autre regard », Annales des Mines, numéro *Après Copenhague*, juillet 2010.

Les effets positifs - réduction des effets du froid sur la santé et sur les besoins en chauffage, accroissement du cycle de l'eau, effets sur la croissance végétale et stimulation de la biodiversité, agriculture dans les zones froides, libération de l'Arctique pour la navigation et l'extraction pétrolière) –,sont à mettre en balance avec les effets négatifs : impacts santé des canicules, consommation pour la climatisation, hausse du niveau de la mer et acidification, déséquilibres hydriques accentués, pluies instantanées intenses et ruissellement, effets sur les sols et désertification de certaines zones, désassemblages d'espèces etc.

Or l'adaptation au changement n'est pas gratuite et suppose une plasticité politique (contreparties prises aux gagnants au profit des perdants, acceptation de migrations, ce qui n'a rien de nouveau dans l'histoire de l'humanité mais se heurte à un raidissement dans un monde plus occupé).

Surtout, l'accroissement du coût et la crainte que des événements extrêmes se multiplient si le réchauffement dépassait un certain seuil est à prendre en considération. Mais aucun seuil n'est à ce jour validé par l'expertise scientifique Celui de 2 degrés - dont la transposition en termes d'émissions de CO2 varie du simple au double selon les modèles - ne figure dans aucun rapport d'experts du GIEC, dans aucun des résumé pour décideurs établis par les représentants gouvernementaux. On le trouve par contre répété à satiété dans des déclarations des politiques reprises à tout va : plus on s'éloigne de l'expertise du GIEC et plus les affirmations à ce sujet s'apparentent à un credo.

[13] Henri Prévot : *Trop de pétrole*, Seuil, 2007. *La nouvelle géopolitique du carbone*, Esprit, juin 2010. Adolphe Nicolas : *Energies, une pénurie au secours du climat ?* Belin-Pour la science, juillet 2011. Le premier diagnostique un excès d'hydrocarbures, le second une pénurie, d'où des médecines opposées.

Les études sur le marché du pétrole se rapportent à des concepts simplistes comme le « peakoil », date à laquelle la production de pétrole « conventionnel » cessera de croître, ce qui n'a pas de portée car le relais sera pris (dans une mesure qui est tout le problème) par des pétroles « non conventionnels » plus chers et plus dangereux.

(sobriété et efficacité des cycles) et de développer une pluralité d'offres (hydrocarbures « non conventionnels », charbon avec une part de séquestration du CO2, énergies renouvelables, nucléaire de nouvelles générations) entre lesquelles les bifurcations pourront se faire en fonction des données économiques et de l'acceptabilité sociale et politique. Dans cette « mer des tempêtes »il faut identifier les éléments qui détermineront le comportement des marchés et les instabilités chaotiques qui pourront le parcourir et qui sont la contrepartie des ruptures (technologiques, géopolitiques…) et des bifurcations possibles.

PRINCIPES D'UNE TAXE CARBONE-ENERGIE

Rappelons la condition préalable qu'est La rigueur dans le fonctionnement des marchés:

- une cotation reflétant les échanges réels et un minimum de transparence ; frein aux transactions purement financières. Exemple : propositions du rapport de Jean-Marie Chevalier en 2010, propositions au G20.

- Un suivi fondé sur une surveillance effective et une modélisation des perturbations.

Le principe de la régulation repose sur la suppression des subventions actuelles (sur toutes les énergies) et l'instauration d'une taxe carbone et/ou énergie qui constituerait un levier de pilotage. Cette taxe provoquant une forte augmentation, inciterait aux investissements de substitution et mettrait fin aux effondrements de prix si dissuasifs pour les investissements dans l'efficacité et la sobriété. Son action s'exercerait à tous niveaux : celui des choix individuels, celui des équipements collectifs, du partage des rentes[14]. Ce basculement fiscal répondrait à une logique qui s'impose face aux raretés[15]. Point important : le principe des compensations doit être reconnu par l'OMC pour que les pays et les régions économiques puissent décider du niveau et de son évolution dans le temps.

Modalités de la taxe: - niveau assurant dès à présent un seuil de prix de 120 dollars avec une perspective de montée progressive - l'imposition sur la ressource, de loin la plus simple et contrôlable, mais intégration d'une partie représentative des conséquences négatives des émissions - en considération de l'impact sur la demande, application à un mix énergie et carbone plutôt que le seul carbone - compensation des différences aux frontières - compensations sociales de transition.

La part de taxation liée aux émissions serait conçue pour tenir compte des actions de réduction (séquestration du CO2, réduction des fuites de méthane…). En revanche les impacts et risques localisés relèvent de taxes type pollueur/payeur classiques, en plus des mesures de normalisation et de contrôle technique (exemple : extraction des ressources non conventionnelles, transport, déchets dangereux pour la santé …)

[14] Les rentes qui ont constitué une des bases de la réflexion économique classique sont généralement occultées aujourd'hui alors qu'elles deviennent gigantesques ; comme elles sont inhérentes à l'extension des raretés, l'objectif réaliste est de les partager par le moyen de la fiscalité et de surveiller leur bon usage.

[15] J.-M. Severtino et O. Ray : *Le grand basculement,* 2011. Les auteurs se réfèrent à Karl Polanyi, *La Grande transformation*.

C'est bien une inversion des réactions qu'il faut obtenir. Les chutes de prix sont bien accueillies par les pouvoirs publics alors qu'elles torpillent leurs efforts, et que les pointes qu'elles redoutent sont les seuls avertissements ressentis par les usagers (ce qui n'exclut pas d'en atténuer les conséquences sociales).

L'ERREUR DU MARCHE CARBONE.

L'Europe, qui n'a cessé de se diviser, s'est ralliée à Kyoto aux marchés de droits à émettre par le procédé dit *Cap and trade* qui consiste à attribuer des quotas et à laisser s'établir un marché. C'était une grave erreur car la formule ne marche que dans des zones (exemple du marché SO2 aux Etats-Unis, électrique en Angleterre) et elle ne se compense pas aux frontières de celles-ci. Il était illusoire de croire que d'autres grandes régions économiques puissent accepter une démarche qui suppose une autorité internationale de rationnement. Le marché carbone, direct et dérivé, institué en Europe, a été vicié par des escroqueries, des trafics des crédits acquis dans les pays du sud qui rappellent que la création artificielle de nouvelles valeurs avec des attributions de rentes est spéculative et immorale. Elle ne permet même pas d'attribuer un prix significatif aux autorisations d'émissions[16]. Devant l'échec patent, les remèdes proposés pour encadrer les variations de prix rendront le système encore plus artificiel et accroîtront les coûts de transaction sans lui donner de la lisibilité. L'opération s'avère suicidaire en période de crise : le dispositif a contribué à la délocalisation des industries européennes, et la baisse des émissions de CO2 a été plus que compensée par la croissance de l'équivalent carbone des produits importés[17].

Conclusions

La croissance doit s'ajuster aux limites de la planète, une transition démographique bien engagée constituant un préalable. Parmi les conséquences, la raréfaction à terme des ressources en combustibles fossiles, et les risques relatifs à l'énergie (ceux du CO2 n'étant pas parmi les plus préoccupants si la transition est bien pilotée) imposent une gouvernance mondiale de la sûreté.

Une certitude : le marché, régulé de façon appropriée, appuyé par un effort pédagogique et d'innovation, est aujourd'hui de taille à provoquer la révolution technique et comportementale. Son pilotage doit être à la hauteur de l'enjeu, adapté à son caractère global et aux incertitudes de l'évolution, sans se heurter aux spécificités nationales ou locales. Une taxe carbone-énergie, reflétant le basculement des raretés, répond à ces conditions

Une conviction : celle qui m'a conduit à introduire ce texte par le récit échafaudé par Primo Levi à Auschwitz, Cette conviction est que les catastrophes sont morales autant que physiques, l'imaginaire[18] est un instrument à privilégier pour en écarter la réalisation. La leçon est claire : ne pas violenter la nature, mais comprendre ses forces, s'y intégrer, stimuler la vie et la créativité sans

[16] C'est l'espoir d'un prix mondial du carbone que souhaite le secrétaire américain à l'énergie (Le Monde daté du 22 octobre), et qu'il est illusoire d'obtenir par cette voie. Saura-t-il surmonter l'opposition dogmatique de son pays à la taxe qui permettrait une approche réaliste ?

[17] Frédéric Denhez : *La dictature du carbone,* Fayard, septembre 2011, porte sur ce sujet un diagnostic bien étayé et propose l'abandon du marché carbone « quand il en est encore temps ». Parmi les nombreuses publications, on peut se rapporter, comme plaidoyer, à celui d'un des acteurs de la Caisse des dépôts (qui a de meilleurs champs que celui-là pour sa mission de service public) Christian de Pertuis : *Et pour quelques degrés de plus,* et pour les analyses sereines à - Michel Rocard *: Rapport sur la taxe carbone,* 2009, - Yves Martin dans le numéro des Annales des Mines à sa mémoire, à paraître en janvier 2012, - P. Criqui, B. Farago et A. Grandjean : *Les Etats et le carbone*, PUF, 2009.

[18] Outre J-P Dupuy, Annie Le Brun : *Perspective dépravée : entre catastrophe réelle et catastrophe imaginée*, Editions du Sandre, septembre 2011.

verser dans l'apocalypse et la contrition[19], rebondir en s'adaptant - L'adaptation, propriété de la vie, capacité supérieure de l'homme.

Paul-Henri Bourrelier
Octobre 2011

Annexe : extraits du livre de Primo Levi : *Le Système périodique*

« C'est vers le carbone, élément de la vie, que se tournait mon premier rêve littéraire, un rêve insistant, à une heure et en un lieu où ma vie ne valait pas grand-chose : oui, je voulais raconter l'histoire d'un atome de carbone.

Le carbone, en effet, est un élément singulier : c'est le seul qui soit capable de s'unir avec lui-même en longues chaînes stables sans grande dépense d'énergie, et à la vie sur la terre (la seule que nous connaissions jusqu'ici) il faut justement de longues chaînes. C'est pourquoi le carbone est l'élément clé de la substance vivante –mais sa promotion, son entrée dans le monde vivant, n'est pas aisée, elle doit suivre un itinéraire obligé, compliqué, qui n'a été éclairci (et pas définitivement encore) que ces dernières années. Si l'avatar organique du carbone ne se déroulait pas quotidiennement autours de nous, à l'échelle de milliards de tonnes par semaine, partout où affleure le verts d'une feuille, le nom de miracle lui reviendrait de plein droit.

Cet événement décisif, ce fulgurant travail à trois – de l'anhydride carbonique, de la lumière et du vert végétal – n'a pas, jusqu'à présent, été décrit en termes définitifs, et peut-être ne le sera-t-il pendant longtemps encore tellement il est différent de cette autre chimie « organique » qui est l'œuvre encombrante, lente et puissante de l'homme ; et cependant cette chimie fine et déliée a été « inventée » il y a deux ou trois milliards d'années par nos sœurs silencieuses, les plantes qui n'expérimentent et ne discutent pas, et dont la température est identique à celle de l'ambiance où nous vivons.

L'anhydride carbonique – forme aérienne du carbone dont nous avons parlé jusqu'ici - ce gaz qui constitue la matière première de la vie, la provision permanente dans laquelle puise toute ce qui croît, et l'ultime destin de notre chair, n'est pas un des composants principaux de l'air, mais un ridicule déchet, une « impureté » trente fois moins abondante que l'argon dont personne ne perçoit la présence… A l'échelle humaine, c'est une acrobatie chargée d'ironie, un tour de jongleur, une incompréhensible ostentation d'omniprésence arrogante, puisque c'est de cette impureté de l'air toujours renouvelée que nous venons – nous les animaux et nous les plantes, et nous l'espèce humaine, avec nos quatre milliards d'opinions discordantes, nos millénaires d'histoire, nos guerres, nos hontes et nos noblesses et notre orgueil.

Nous sommes de nouveau anhydride carbonique, ce dont nous nous excusons : c'est encore une fois un passage obligé ; on peut en imaginer ou en inventer d'autres, mais sur la terre c'est ainsi.

[19] Bruno Tertrais : *L'Apocalypse n'est pas pour demain*, Denoel, 2011.
Pascal Bruckner : *Le fanatisme de l'apocalypse,* Grasset 2011.

Nous le laisserons voler trois fois autour du monde jusqu'en 1960, et pour justifier un espace de temps si long à la mesure humaine, nous ferons remarquer qu'il est au contraire beaucoup plus bref que la moyenne : celle-ci nous assure-t on est de deux cents années. Tous les deux cents ans, chaque atome de carbone qui n'est pas congelé dans des matériaux devenus stables (comme précisément le calcaire, le charbon fossile ou certaines matières plastiques) entre et rentre dans le cycle de la vie par la porte étroite de la photosynthèse. Existe-t-il d'autres portes ? Oui : quelques synthèses crées par l'homme ; elles sont un titre de noblesse pour l'*homo faber*, mais jusqu'à présent, leur importance quantitative est négligeable. Ce sont des portes encore beaucoup plus étroites que celles du vert végétal : consciemment ou non, l'homme n'a pas tenté jusqu'ici de rivaliser sur le terrain avec la nature

Je pourrais raconter des histoires à n'en plus finir : d'atomes de carbone qui deviennent couleur et parfum dans les fleurs ; d'autres qui d'algues menues en petits crustacés, puis en poissons de plus en plus gros , redeviennent anhydride carbonique dans les eaux de la mer , dans un perpétuels et effrayant carrousel de vie et de mort où chaque dévorant est immédiatement dévoré ; de ceux qui au contraire atteignent une très digne semi éternité dans les pages jaunies de quelque document d'archive ou dans les toiles d'un peintre fameux ; d'autres à qui échut le privilège de faire partie d'un grain de pollen et qui laissèrent leur empreinte fossile dans les roches pour notre curiosité ; d'autres encore qui s'abaissèrent à faire partie des mystérieux messagers en forme de semence humaine et participèrent au subtil processus de scission, duplication et fusion dont chacun de nous est né. »

LECTURES COMPLÉMENTAIRES

- C. Le Quéré, ***Global carbon budget 2013***, Earth system science data volume 6, Copernicus Publication, pp 235-263, 2014.
  http://www.earth-syst-sci-data.net/6/235/2014/essd-6-235-2014.html
  http://www.earth-syst-sci-data.net/6/235/2014/essd-6-235-2014.pdf

- Etude sur la prospective internationale des conditions de vie « ***Securing Livelihoods for All »***, OCDE, mars 2015.
  http://2100.org/tv/3071/prospective-ocde-des-conditions-de-vie/

- Rapport ***« Contribution à la lutte contre l'effet de serre : stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? »,*** INRA, octobre 2002.
  http://institut.inra.fr/Missions/Eclairer-les-decisions/Expertises/Toutes-les-actualites/Stocker-du-carbone-dans-les-sols-agricoles-de-France

- Rapport ***« Les contributions possibles de l'agriculture et de la forêt à la lutte contre le changement climatique »***, CGAAER, septembre 2014.
  http://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-22731-rapport-cgaaer.pdf

- Troisième volet de l'exercice de prospective Visions Energie Climat 2030 / 2050 : ***Quels modes de vie pour demain ?***, ADEME, juin 2014.
  http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/visions-energie-climat-2030-2050-partie-1-2014-8102.pdf

LISTE DES PARTICIPANTS

Nom, Prénom	Organisme
APPERT Olivier	Conseil français de l'énergie
ARSIGNY Vincent	Conseil général de l'économie
AZEMA Jean	Commune de Caderousse
BAUDUCEAU Nicolas	CEPRI
BAZIN Danièle	IFFO-RME
BENOIT Guillaume	Conseil général de l'agriculture
BERIOT Nicolas	Ministère de l'écologie / ONERC
BOISSON Pierre	-
BONIJOLY Didier	BRGM
BOULLE Philippe	Consultant
BOUR Emmanuelle	France Bois Industries Entreprises
BOUR DESPREZ Barbara	Conseil général de l'agriculture
BOURNONVILLE Dominique	-
BOURRELIER Paul-Henri	AFPCN
BOURRELIER Théo	Sciences Po Paris
BOUVELOT Pierre	VNF
BRUN BARRIERE Eric	Ministère de l'écologie / ONERC
CAPBLANCQ Juliana	CCR
CASADEMONT Marie-Louise	ARCLES
CHICOU Héloïse	Partenariat Français pour l'Eau
CHOMIENNE Jean-Pierre	Conseil général de l'agriculture
CIAIS Philippe	LSCE
CLEMENT Daniel	ADEME
CLIN François	BRGM
COLIN Antoine	IGN
COLSON Alice	Action contre la faim
COMPARET Pierre-Marie	Association de défense des digues
COUVEINHES Pierre	Conseil général de l'économie

CRESPO David	Fertiprado
CZOP Valérie	EDF
De BETHENCOURT Anne	Fondation Nicolas Hulot
DEBLONDE Patrick	AFPCN
De GALBERT Michel	Conseil général de l'agriculture
De MONTLEAU Béatrice	Banque Neuflize OBC
DENEGRE Jean	Académie des technologies
DENEUFBOURG Guy	AFPCN
DEVES Maud	IPGP
DIETHRICH Robert	RD International Consult
EGLIN Yann	IRSTEA
EYRARD Julien	Action contre la faim
FEUNTEUN René	AFPCN
FOUCHARD CHANTREUIL Céline	Conseil général de l'économie
GAUDIN Thierry	Prospective 2100 / Conseil général de l'économie
GUEGAN Carine	Conseil général de l'économie
GUILLOU Rémi	Chambre du commerce / Chambre des métiers Orléans
JEREMIE Pierre	Ingénieur des Mines
JUFFE Michel	AFPCN
KERT Christian	Député des Bouches du Rhône
LAGAIN Martine	Val d'Oise environnement
LAGRANGE Alain	Ministère de l'éducation nationale, de l'enseignement supérieur et de la recherche
LAVAL Katia	Université Pierre et Marie Curie / IPSL
LE BARS Yves	AFPCN
LEFEBVRE Philippe	Mines Paristech
LEVRAULT Frédéric	Chambre d'agriculture Poitou Charentes
LEVRAUT Anne Marie	Ministère de l'écologie / CGEDD
LOUDIERE Daniel	SHF
MAHE Sylvain	Ministère de l'éducation nationale de l'enseignement supérieur et de la recherche / DGRI
MARTIN Marc-Antoine	Académie de l'eau / Fonds d'adaptation

MAZIERE Brigitte	AFPCN
MBAYE Moussa	ENDA Tiers Monde
MICHEL Laurent	Ministère de l'écologie / DGEC
PELEGRIN Marc	Académie des technologies
PETRELLE Julie	AFPCN
PEYRON Jean-Luc	GIP Ecofor
PIALLA René	Association des riverains du Rhône
PONTIKIS Constantin	Université Antilles Guyane
REDAUD Jean-Luc	Partenariat français pour l'eau
ROTHSCHILD Elsa	AFPCN
ROUSSEAU Luc	Conseil général de l'économie
ROUSSY Sandrine	Action contre la faim
SARRAZIN Michèle	Mairie de Salaise- sur-Sanne
SCHECHTER Caroline	Ministère de l'agriculture
SOLLOGOUB Pierre	AFPS
SORRO Jean-François	Conseil général de l'économie
SOUSSANA Jean-François	INRA
TARDIEU Bernard	Académie des technologies
THOUVENOT Serge	Orange
TROUILLET Bernard	Infoclimat
TRUYOL Albert	Expert
TUUHIA Vaia	Association 4D
VALERIAN François	Conseil général de l'économie
VIAL Estelle	Institut technologique FCBA
VIGNON Cathy	Mosson Coulée Verte
VILLERS Sophie	Conseil général de l'agriculture
WALBAUM Véronique	Handicap international
WOHRER Michel	MW Conseil
ZAJDEWEBER Daniel	AFPCN
ZILLI Dario	INRA